



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院空天信息创新研究院
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

2021
02
VOL.26

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



深度神经网络结构搜索 P245



第26卷第2期（总第298期）

2021年2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
中文核心期刊

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 中国科学院空天信息创新研究院
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 吴一戎
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
通信地址 北京市海淀区北四环西路19号
邮 编 100190
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-58887035
网 址 www.cjig.cn

广告发布登记号 京朝工商广登字20170218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 Aerospace Information Research Institute, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief Wu Yirong
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics
Address No. 19, North 4th Ring Road West, Haidian District, Beijing, P. R. China
Zip code 100190
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-58887035
Website www.cjig.cn

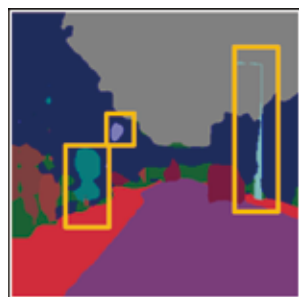
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

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 60.00元



单幅图像刚体目标姿态估计方法综述(第0334页)



DeepLabv3plus-IRCNet: 小目标特征提取的图像语义分割(第0391页)



融合视觉风格和标签约束的少数民族服装图像解析(第0402页)

前沿进展

NeurIPS 2020观察与分析

林宙辰, 王奕森 0229

学者观点

深度神经网络结构搜索综述

唐浪, 李慧霞, 颜晨倩, 郑侠武, 纪荣嵘 0245

无参考图像质量评价研究进展

方玉明, 眭相杰, 鄢杰斌, 刘学林, 黄丽萍 0265

轨道病害视觉检测: 背景、方法与趋势

王建柱, 李清勇, 张靖, 甘津瑞 0287

RMFS-CNN: 遥感图像分类深度学习新框架

赵雪梅, 吴军, 陈睿星 0297

综述

深度学习在医学影像智能处理中的应用与挑战

左艳, 黄钢, 聂生东 0305

视频车辆黑烟检测算法研究进展

张天琪, 杨伟东, 张姣姣, 彭凯 0316

单幅图像刚体目标姿态估计方法综述

杨步一, 杜小平, 方宇强, 李佩阳, 王阳 0334

流体运动估计光流算法研究综述

邵绪强, 杨艳, 刘艺林 0355

图像处理和编码

帧内块复制中的位移矢量参数编码算法

赵利平, 林涛, 杨玉芬, 胡珂立, 彭华 0368

图像分析和识别

遮挡判定下多层次重定位跟踪算法

姜文涛, 金岩, 刘万军 0378

DeepLabv3plus-IRCNet: 小目标特征提取的图像语义分割

刘文, 王海荣, 周北京 0391

融合视觉风格和标签约束的少数民族服装图像解析

张茜, 刘骊, 甘霖, 付晓东, 刘利军, 黄青松 0402

孪生导向锚框RPN网络实时目标跟踪

尚欣茹, 温尧乐, 奚雪峰, 胡伏原 0415

融合密度和精细分数的行人检测

甄烨, 王子磊, 吴枫 0425

图像理解和计算机视觉

融合边缘保持与改进代价聚合的立体匹配算法

程德强, 李海翔, 寇旗旗, 于泽宽, 庄焕东, 吕晨 0438

医学图像处理

Seg-CapNet: 心脏MRI图像分割神经网络模型

刘畅, 林楠, 曹仰杰, 杨聪 0452

遥感图像处理

自适应感受野机制遥感图像分割模型

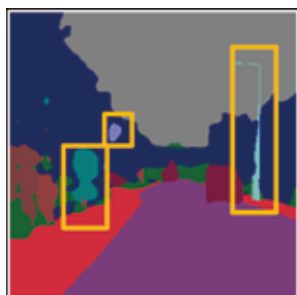
刘航, 汪西莉 0464

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Review of rigid object pose estimation from a single image (P0334)



DeepLabv3plus-IRCNet: an image semantic segmentation method for small target feature extraction (P0391)



Clothing parsing of Chinese minorities via the fusion of visual style and label constraints (P0402)

Frontier

Report of NeurIPS 2020

Lin Zhouchen, Wang Yisen 0229

Scholar View

Survey on neural architecture search

Tang Lang, Li Huixia, Yan Chenqian, Zheng Xiawu, Ji Rongrong 0245

Progress in no-reference image quality assessment

Fang Yuming, Sui Xiangjie, Yan Jiebin, Liu Xuelin, Huang Liping 0265

Visual inspection of rail defects: background, methodologies, and trends

Wang Jianzhu, Li Qingyong, Zhang Jing, Gan Jinrui 0287

RMFS-CNN: new deep learning framework for remote sensing image classification

Zhao Xuemei, Wu Jun, Chen Ruixing 0297

Review

Application and challenges of deep learning in the intelligent processing of medical images

Zuo Yan, Huang Gang, Nie Shengdong 0305

Video black smoke detection methods for vehicles: a survey

Zhang Tianqi, Yang Weidong, Zhang Jiaojiao, Peng Kai 0316

Review of rigid object pose estimation from a single image

Yang Buyi, Du Xiaoping, Fang Yuqiang, Li Peiyang, Wang Yang 0334

Review of optical flow algorithms in fluid motion estimation

Shao Xuqiang, Yang Yan, Liu Yilin 0355

Image Processing and Coding

Displacement vector coding algorithm for intra block copy

Zhao Liping, Lin Tao, Yang Yufen, Hu Keli, Peng Hua 0368

Image Analysis and Recognition

Multilevel relocation tracking algorithm under occlusion decision

Jiang Wentao, Jin Yan, Liu Wanjun 0378

DeepLabv3plus-IRCNet: an image semantic segmentation method for small target feature extraction

Liu Wen, Wang Hairong, Zhou Beijing 0391

Clothing parsing of Chinese minorities via the fusion of visual style and label constraints

Zhang Qian, Liu Li, Gan Lin, Fu Xiaodong, Liu Lijun, Huang Qingsong 0402

Target tracking system based on the Siamese guided anchor region proposal network

Shang Xinru, Wen Yaole, Xi Xuefeng, Hu Fuyuan 0415

Pedestrian detection method based on density and score refinement

Zhen Ye, Wang Zilei, Wu Feng 0425

Image Understanding and Computer Vision

Stereo matching algorithm based on edge preservation and improved cost aggregation

Cheng Deqiang, Li Haixiang, Kou Qiqi, Yu Zekuan, Zhuang Huandong, Lyu Chen 0438

Medical Image Processing

Seg-CapNet: neural network model for the cardiac MRI segmentation

Liu Chang, Lin Nan, Cao Yangjie, Yang Cong 0452

Remote Sensing Image Processing

Remote sensing image segmentation model based on an adaptive receptive field mechanism

Liu Hang, Wang Xili 0464

中图法分类号: TP919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2021)02-0368-10

论文引用格式: Zhao L P, Lin T, Yang Y F, Hu K L and Peng H. 2021. Displacement vector coding algorithm for intra block copy. Journal of Image and Graphics, 26(02): 0368-0377 (赵利平, 林涛, 杨玉芬, 胡珂立, 彭华. 2021. 帧内块复制中的位移矢量参数编码算法. 中国图象图形学报, 26(02): 0368-0377) [DOI:10.11834/jig.190570]

帧内块复制中的位移矢量参数编码算法

赵利平¹, 林涛², 杨玉芬², 胡珂立¹, 彭华¹

1. 绍兴文理学院计算机科学与工程系, 绍兴 312000; 2. 同济大学超大规模集成电路研究所, 上海 200092

摘要: 目的 随着云计算和移动互联网技术的飞速发展, 屏幕图像编码已成为视频压缩领域新的研究热点。帧内块复制 (intra block copy, IBC) 算法是屏幕内容编码 (screen content coding, SCC) 中的核心算法, 已经成为高效视频编码 (high efficiency video coding, HEVC) 等标准中屏幕内容编码的重要组成部分。为了进一步消除 IBC 算法中的位移矢量 (displacement vector, DV) 参数编码的冗余, 根据 DV 参数具有的固有帧内块匹配特性和相关性, 提出了一种 DV 参数编码算法。方法 首先, 对待编码 DV 采用邻近块与最近块相结合的 DV 预测编码方案, 进一步提高 DV 的预测编码效率; 然后, 对预测编码效率不高的 DV, 提出了一种基于区域划分与调整的高效 DV 直接编码方案。对 SCC 标准测试数据集中的 17 个测试数据集合的 3 种编码配置从编码效率和复杂度两方面进行了评测。结果 实验结果表明, 对于 SCC 标准测试数据集中移动的文字和图形序列类别, 在全帧内、随机接入和低延迟这 3 种有损编码配置下, 提出的 DV 算法与 HEVC SCC 中的 IBC 算法相比, 在编解码复杂度没有任何影响的前提下, Y 分量的 BD (Bjontegaard Delta)-rate 平均降低率分别为 1.04%、0.87% 和 0.93%, 全帧内配置下 Y 分量的 BD-rate 降低率可达 2.99%。结论 本文方法优于 HEVC-SCC 中的 IBC 算法中的 DV 编码算法, 能有效提升编码效率。
关键词: 高效视频编码 (HEVC); 数字音视频编解码; 屏幕内容编码; 位移矢量; 预测编码; 直接编码

Displacement vector coding algorithm for intra block copy

Zhao Liping¹, Lin Tao², Yang Yufen², Hu Keli¹, Peng Hua¹

1. Department of Computer Science and Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China;

2. Institute of Very Large Scale Integration Circuit, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: **Objective** With the recent rapid development of technologies in cloud computing and mobile internet, screen content coding (SCC) has become a key technology in many popular applications, such as videoconferencing with document or slide sharing, remote desktop, screen sharing, mobile or external display interfacing, and cloud gaming. Typical computer screen content contains a mixture of camera-captured and screen contents. Screen content exhibits highly different characteristics and varied levels of human's visual sensitivity to distortion compared with traditional camera-captured content. Screen content videos are typically not noisy, with sharp edges and multiple repeated patterns. New coding tools for better utilizing the correlation characteristics of screen content are necessary. Accordingly, SCC has become a popular topic in multimedia applications in recent years and has elicited increasing research attention from academia and industry. Several

收稿日期: 2019-11-09; 修回日期: 2020-05-13; 预印本日期: 2020-05-20

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY19F020015, LY20F020011, LY20F030006); 国家自然科学基金项目 (61871289); 绍兴市公益性技术应用研究计划项目 (2018C10015, 2018C10013); 上海市自然科学基金项目 (18ZR1440600, 19ZR1461100)

Supported by: Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (LY19F020015, LY20F020011, LY20F030006); National Natural Science Foundation of China (61871289); Shanghai Municipal Natural Science Foundation (18ZR1440600, 19ZR1461100)

international video coding standards include efficient SCC capability, such as high efficiency video coding (HEVC), versatile video coding (VVC), and second-generation and third-generation audio video coding standard (AVS2 and AVS3, respectively). Repeated identical patterns (i.e., matching patterns) are frequently observed on the same picture of screen content. Two major SCC tools in HEVC SCC were developed in recent years to utilize these repeated identical patterns with a variety of sizes and shapes. These tools are intra block copy (IBC) and palette coding. IBC, also called intra picture block compensation or current picture referencing, is a highly efficient technique for improving coding performance. It is effective for coding repeated identical patterns with a few fixed sizes and shapes. IBC is a direct extension of the traditional inter-prediction technique for the current picture, wherein a current prediction block is predicted from a reference block located in the already reconstructed regions of the same picture. IBC has been adopted in the HEVC SCC extensions, VVC, and AVS3. In IBC, a displacement vector (DV) is used to signal the relative displacement from the position of the current block to that of the reference block. The coding efficiency of IBC primarily depends on the coding efficiency of DV. The existing DV coding algorithm used in HEVC SCC is the same as the motion vector coding algorithm used in the inter-prediction scheme. However, the existing DV coding algorithm only utilizes the correlations among the DVs of neighboring blocks. Moreover, intra block and inter block matching characteristics exhibit numerous differences. Thus, in accordance with the inherent intra block matching characteristics and different correlations of DV parameters in the IBC algorithm, we propose an improved DV algorithm for further increasing the coding efficiency of IBC. **Method** The DV to be coded has been proven to exhibit numerous correlations not only with neighboring blocks but also with recently coded blocks. To utilize the correlations of DVs with neighboring and recently coded blocks, we first apply an improved DV coding algorithm that adaptively uses DV predictions from either neighboring or recently coded blocks. Second, a direct DV coding scheme that uses a DV region division algorithm and a DV adjusting algorithm is proposed to eliminate redundancies further in the existing DV coding algorithm. Lastly, we evaluate coding performance and complexity on 17 test datasets from the SCC standard test dataset with three encoding configurations. In particular, 13 sequences are selected to represent the most common screen content videos, referred to as the “text and graphics with motion” (TGM) category, and 4 sequences are selected to represent a mixture of natural video and text/graphics, referred to as the “mixed content” category. **Result** Experimental results show that the proposed algorithm achieves average γ BD-rate reductions of up to 1.04%, 0.87%, and 0.93% for the TGM category of the SCC common test sequences with lossy all intra (AI), random access, and low-delay B configurations, respectively, compared with the latest HEVC SCC at the same encoding and decoding runtimes. The maximum γ Bjøntegaard Delta (BD)-rate reduction reaches 2.99% in the AI configuration. **Conclusion** The experiment results demonstrate that our algorithm outperforms the DV coding algorithm for IBC in HEVC SCC.

Key words: high efficiency video coding (HEVC); audio video coding standard (AVS); screen content coding (SCC); displacement vector (DV); prediction coding; direct coding

0 引言

在全球全社会“抗疫”期间,以大规模远程办公、线上教学和远程会议等为典型代表的远程在线互动活动发挥着不可替代的作用,并对社会活动形态产生了深刻影响。屏幕内容编码(screen content coding, SCC) (Peng 等, 2016) 技术是解决这些远程活动中“屏幕共享和显示”等带来的应用客户端与服务器端大流量数据传输瓶颈问题的关键技术。

近年 SCC 技术的研究工作主要围绕各大标准展开,包括高效视频编码标准(high efficiency video

coding, HEVC) 的 SCC 扩展版(Peng 等, 2016)、最新的 VVC (versatile video coding) 标准(Chen 等, 2020)、我国第二代数字音视频编码技术标准(the second generation audio video coding standard, AVS2) (马思伟 等, 2017) 的屏幕混合内容视频编码(screen and mixed content coding, SMCC) 扩展版(赵利平等, 2019b) 和最新 AVS3 标准(李一鸣 等, 2019) 等, SCC 也称 SMCC。

屏幕图像的一个显著特点是同一帧图像内通常会有很多相似甚至完全相同的像素图样。针对屏幕图像这一特点, HEVC SCC 扩展版中采用基于重复样图匹配技术大幅提高编码效率, 主要包括帧内块

复制 (intra block copy, IBC) 算法 (Pang 等, 2014; Xu 等, 2015, 2016; Miyazawa 等, 2014; Tourapis 等, 2015)、调色板 (palette, PLT) 算法、帧内线条复制 (intra line copy, ILC) 算法和串匹配 (string matching, SM) (Lin 等, 2013) 算法等。串匹配算法主要包括仿 2 维串匹配算法 (Zhao 等, 2016), 通用串匹配算法 (Zhao 等, 2018), 基于 AVS2 的像素串匹配算法 (赵利平等, 2018) 和通用串预测算法 (赵利平等, 2019a, b)。其中, IBC 算法 (也称为 CPR (current picture reference) 算法) (Xu 等, 2016) 是将传统的帧间预测算法扩展到当前帧, 采用有限种固定大小的帧内块匹配方式 (如大小为 $4 \times 8, 8 \times 4, 8 \times 8, 16 \times 16, 32 \times 32, 64 \times 64$ 的块)。IBC 算法具有与 HEVC 的编码单元 (coding unit, CU) 兼容性好、能大幅提高屏幕内容编码效率的优势, 因此被 HEVC SCC 采纳, 目前也被 VVC 标准 (Chen 等, 2020) 和 AVS3 标准 (李一鸣等, 2019) 采纳。

表示当前帧中当前块与参考块位置关系的位移矢量 (displacement vector, DV) 参数是 IBC 算法编码参数的重要组成部分, 如何对 DV 参数进行有效编码成为 IBC 算法中提高屏幕图像编码效率的一个核心问题。帧间预测算法运动估计中的运动矢量 (motion vector, MV) 参数、串匹配算法的 Offset 参数 (赵利平等, 2017) 与 IBC 算法的 DV 参数有相似之处, 但是在参考范围、匹配形成机理、匹配特性和时空相关性方面等存在不同。因此, MV 参数和 Offset 参数的优化算法, 在 DV 参数的优化算法研究中具有一定的借鉴作用, 但也不能简单地照搬。随着对 IBC 算法的研究, 出现了一些 DV 参数的优化算法。Tourapis 等人 (2015) 提出了采用与帧间预测算法的 MV 编码相统一的编码方案——基于邻近块预测的 DV 编码方案, 具有编码效率进一步提高且修改语法元素较少的优势, 被 HEVC SCC 采纳。

为了进一步提升 IBC 算法的编码效率, 本文在最新 HEVC SCC 参考软件的基础上, 根据 IBC 算法中位移矢量体现出的不同的相关性与匹配特性, 提出了一种自适应邻近块或最近块 DV 预测方案和 DV 直接编码方案的 DV 编码算法。实验结果表明, 对于 HEVC SCC 标准和 AVS2 SMCC 标准通用测试数据集中的视频序列, 提出的算法与 DV 算法相比, 在编解码复杂度相同的前提下, 进一步提升了 SCC 的编码效率。主要创新点包括: 1) 针对待编码

DV 的邻近相关性和最近相关性 (当前编码 DV 与最近块 DV 重复率比较高), 在 IBC 算法基于邻近块预测的 DV 编码方案的基础上, 提出了一种邻近块与最近块相结合的 DV 预测编码方案, 进一步提高 DV 的预测编码效率; 2) 针对帧内复制算法在搜索机制、匹配形成机理和 DV 的取值限制等方面具有的固有特性和统计特点, 对预测编码效率不高的 DV, 提出了一种基于区域划分与调整的高效 DV 直接编码方案。通过对不同区域的 DV 采用不同的调整和编码方案, 进一步提高 DV 的总体编码效率。

1 相关工作

IBC 算法 (或称 CPR 算法) 是帧间运动估计和补偿算法在当前帧内的扩展。帧间运动估计和补偿的参考像素在当前帧编解码之前已经完成的编解码的重建图像帧中, 而 IBC 的参考像素在当前帧内已经完成的帧内重建图像帧中。DV 参数是 IBC 算法 (Xu 等, 2016) 的主要编码参数, IBC 算法的位移矢量如图 1 所示。

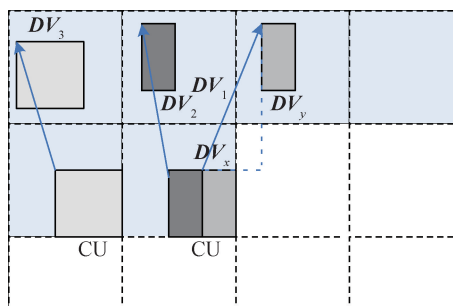


图 1 IBC 算法位移矢量 (DV) 图示

Fig. 1 Displacement vector (DV) examples for IBC algorithm

从图 1 可以看出, DV 由水平和垂直位移矢量 DV_x 和 DV_y 组成, 以整像素为单位 (而 MV 通常以分像素为单位) 来表示当前帧内的参考块与当前块之间的偏移量。其中, DV_x 和 DV_y 分别等于参考块在图像中的水平、垂直坐标值减去当前块的水平、垂直坐标值。根据 HEVC 中块的划分方式, 块匹配的单元可以是最大编码单元 (largest coding unit, LCU), 也可以是由 LCU 再进一步划分的 CU 和 CU 进一步划分的预测单元 (prediction unit, PU)。因此, 一个 CU 可以由一个或两个 DV 组成。

现有 DV 参数的优化算法随着 IBC 算法研究而

相继提出。早期典型的优化算法包括 Pang 等人 (2014) 和 Xu 等人 (2015) 提出的采用两个最近块与邻近块相结合的预测方案、Miyazawa 等人 (2014) 提出的自适应编码 DV 差值与直接编码 DV 的方案。这些方案 (Pang 等, 2014; Xu 等, 2015; Miyazawa 等, 2014) 都没有采用帧间预测算法中的 Merge 模式, 总体编码效率比最新 HEVC SCC 参考软件 SCM8.8 (JCT-VC, 2019) IBC 算法的 DV 编码方案要低很多。

如图 2 所示, IBC 算法中 DV 参数编码方案采用邻近块预测编码方案。该方案对待编码的 DV 首先从空间上邻近块的 DV 中选取若干个 DV 形成 Merge 候选列表, 如果用 Merge 候选列表中的某个

DV 取得的率失真代价值 (rate distortion cost, RD-cost) 最优, 则采用 Merge 模式进行编码; 否则, 从邻近块的 DV 中选取若干个 DV 形成位移矢量预测 (motion vector predictor, MVP) 候选列表, 采用高级运动矢量预测 (advanced motion vector prediction, AMVP) 模式进行编码。即首先编码位移矢量差 (motion vector difference, MVD), 再编码预测 DV 在 MVP 候选列表中的索引值 (MVP index)。已有的 DV 参数编码算法没有考虑 IBC 算法 DV 参数具有的固有匹配特性和不同的相关性。图中 RDM 为 RDcost for merge mode, RDA 为 RDcost for AMVP mode。



图 2 基于邻近块预测编码方案的 DV 编码算法流程

Fig. 2 DV coding algorithm flow based on neighboring block predictive coding scheme

2 DV 编码算法

2.1 IBC 中 DV 固有特性与相关性

实验数据集来自 HEVC SCC 标准测试数据集 (Yu 等, 2017) 和 AVS2 SMCC 标准测试数据 (AVS 工作组, 2016)。测试数据的色彩格式采用 YUV 4:4:4。数据统计采用的算法是 HEVC SCC 的参考软件 SCM8.8 (JCT-VC, 2019)。采用 HEVC SCC 标准通用的测试环境, 其中 IBC 的参考范围为全帧范围, 有损编码 QP (quantization parameter) 为 {22, 27, 32, 37}, 测试配置为有损全帧内 (all intra, AI) 配置。选取的测试数据集合为 AVS2 SMCC 中 12 个序列的第 1 帧, 统计对象为采用 IBC 算法的 AMVP 模式进行编码的所有 DV, 统计数据是对 AI 配置 4 个 QP 的所有数据进行累加后获得。图 3 给出了采用 IBC 算法的 AMVP 模式编码的 DV 不同 N 元组 (用来保存编解码顺序上的最近块 N 个 DV, 也称为最近块 DV) 不同序列的 DV 重复率, 即当前编码 DV 在 N 元组中命中的概率。从图 3 可以看出, 当 N 取值为 16 时, *cns* 数据的最近块 DV 重复率达到了 51%, 换言之, 一半以上的待编码 DV 能在最近

块 16 个 DV 组中找到。因此, 仅需要较少的比特编码该 DV 在 N 元组的位置。随着 N 值增大, 最近块 DV 重复率也增高, 但是增长的幅度越来越小。采用实验尝试法, 实验结果表明, N 取值为 8 时, 编码效率最好, 因此本文中 N 取值为 8。

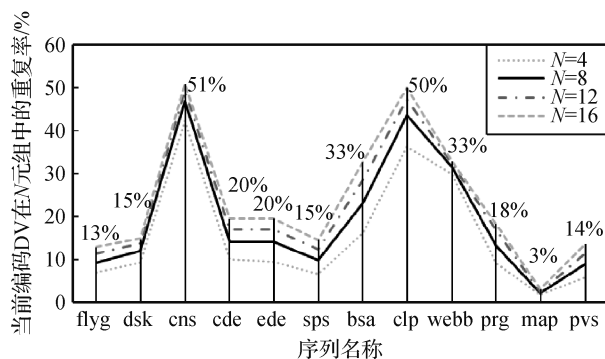


图 3 不同序列中当前编码 DV 在不同的 N 元组情况命中率

Fig. 3 Hit ratio of DVs to be coded in the N DVs for the recently coded blocks with different sequences

图 4 给出了 DV 区域划分示意图和不同 DV 区域频率分布情况。统计数据是对 AI 配置 4 个 QP 的所有数据进行累加后获得。

根据 IBC 算法的搜索机制、计算机产生屏幕图像的机理、对 CTU、CU 和 PU 编码或解码的顺

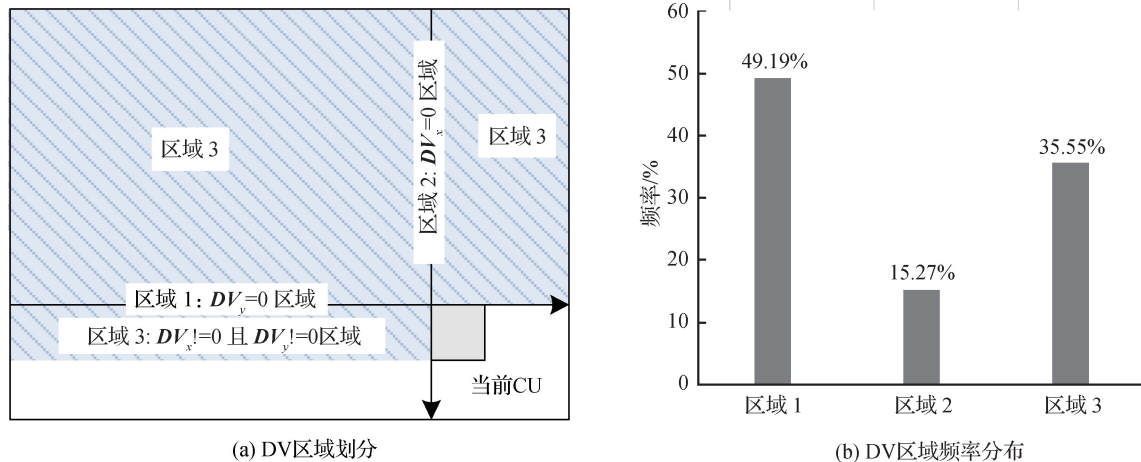


图 4 DV 区域划分与区域频率分布

Fig. 4 DV region divisions and regional frequency distribution ((a) DV region divisions; (b) regional frequency distribution)

序、参考块范围、匹配的最小匹配单元、匹配形状与大小和统计特点,得出 DV 固有的特性与相关性如下:

DV 的相关性主要表现为 DV_x 与 DV_y 的取值范围是互相限制的(DV_y 或 DV_x 的取值范围确定后, DV_x 或 DV_y 存在不可能取值的范围,对这些范围不需要分配二值化的码,从而减少对 DV_x 与 DV_y 进行二值化需要的比特数),主要体现在:

- 1) $DV_x = 0$ 时, $DV_y \neq 0$;
- 2) $DV_x = 0$ 时, $DV_y < 0$ 成立;
- 3) $DV_x > 0$ 时, $DV_y < 0$ 成立;
- 4) $DV_x = 0$ 时,对于不划分的 CU 和划分成两个垂直 PU 的 CU, DV_y 的绝对值大于等于宽度;
- 5) $DV_x = 0$ 时,对于划分成两个水平 PU 的 CU, DV_y 的绝对值都大于等于宽度的一半。将 DV_x 换成 DV_y , DV_y 换成 DV_x ,可以得到与上述类似的性质。

DV 的统计特性主要包括:1)从图 3 可以看出, DV 不仅具有邻近块的相关性,同时也具有最近块的相关性(当前编码 DV 与最近块 DV 重复率比较高);2)从图 4 可以看出,由于 IBC 算法对不同大小的 CU 采用不同的混合搜索策略(1 维、2 维和哈希搜索),但是对不同大小的块都会进行 1 维区域($DV_x = 0$ 或 $DV_y = 0$ 区域)搜索,因此 $DV_y = 0$ 的区域占的比例高达 49.19%, $DV_x = 0$ 的区域占的比例为 15.27%,两个区域的频率总和占到 64.46%;3)计算机产生屏幕图像的内在机理导致在垂直和水平方向的匹配样图出现的概率很高(例如文字横

竖结构比较多)。因此,对于不划分的 CU 和划分成两个水平 PU 的 CU, DV_x 取值为 CU 宽度值出现的频率比较高;对于划分成两个垂直 PU 的 CU, DV_x 取值为宽度的一半的值出现的频率比较高。

本文提出的 DV 编码算法通过分析 DV 参数的相关性,与固有的匹配特性,进一步去除 DV 参数编码的冗余,从而提高 DV 参数的编码效率。

2.2 基于自适应预测方案或直接编码方案的 DV 编码算法

2.2.1 算法描述

图 5 给出了一种自适应邻近块或最近块 DV 预测方案 and 直接编码方案的 DV 编码算法流程。在编码器端,对于待编码的 DV,用空间或时间上邻近块的 DV 进行预测,获得 Merge 模式的 RDcost (记为 RDM);同时用最近块 DV 进行预测,若在 N 元组中,则获得 N 元组模式的 RDcost (记为 RDN);否则进行 AMVP 预测,获得 AMVP 模式的 RDcost (记为 RDA)。当 $RDM < RDA$ (或 RDN) 时,则采用 Merge 模式编码;否则,待编码的 DV 在 N 元组中,则采用 N 元组模式编码,否则采用直接模式编码(具体见 2.2.3 节)。因此,待编码的 DV 最终选择预测方案(邻近块或最近块 DV)或直接编码方案进行编码是根据各种编码方案产生的编码输出比特率和失真度反馈获得 RDcost 值,使当前编码单元的 RDcost 值达到最小化来自适应决定的。

基于自适应预测方案或直接编码方案的 DV 编码算法的具体步骤如下:

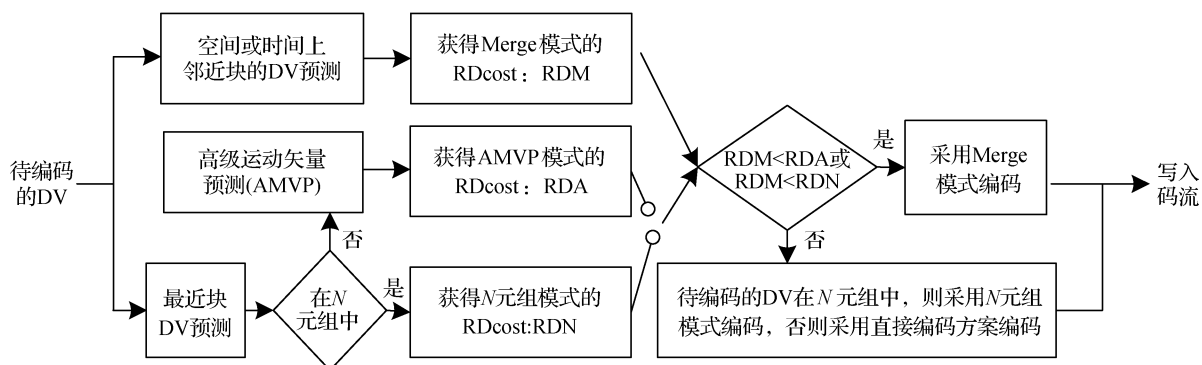


图5 自适应邻近块或最近块DV预测方案和直接编码方案的DV编码算法流程

Fig. 5 DV coding algorithm flow based on adaptively DV prediction scheme from neighboring block or recently coded blocks and direct coding scheme

输入:待编码DV,模式信息,预测信息

输出:DV码流数据

编码Merge模式flag;

IF(当前CU采用Merge模式)//Merge模式编码
编码Merge Index;

ELSE

编码N元组flag;

IF(当前DV在N元组中)//N元组模式编码
编码DV在N元组中的位置;

ELSE

对DV采用直接模式编码;//直接模式编码

END ELSE

END IF

END ELSE

END IF

上述算法中,N元组的位置采用固定长度编码方案进行编码。

2.2.2 最近块DV预测中N元组的建立与更新过程

采用N元组保存最近的N个编码块的DV(N取值为8)。如果当前编码DV在N元组中,则只需要编码当前编码DV在N元组对应的索引值(3 bit),从而进一步提高编码效率。

设 $R_1, R_2, \dots, R_N$ 表示N元组中第1最近,第2最近, $\dots$,第N最近块的DV,在对一帧图像进行编码前对N元组所有的DV都初始化为值(0,0)。

为了保持N元组的最近性(总是保存N个不重复最近编码块的DV),设X是采用非Merge模式编码的当前待编码DV,按照下列方式进行N元组的更新:

1)X等于N元组中某一个DV值的情况。由于X已经在N元组中,则在X不是第1最近DV的前提下,将X调整为第1最近的DV,并相应调整其他DV的顺序。具体调整过程为:设该DV在N元组的位置为i,若 $i \neq 1$ (不是最近块的DV),则将N元组在i位置的DV移至第1最近块的位置,i位置之前的DV依次往后移动一个位置。

2)X不等于N元组任一个DV的值的情况。由于X不在N元组中,则将X设置为第1最近的DV,按照先进先出的原则替换原来N元组中的第N最近块的DV。具体调整过程为:依次将第N-1最近块放置在第N最近块的位置,将X放置在第1最近块的位置。

2.2.3 基于区域划分与调整的DV直接编码方案

在IBC算法中,若当前编码DV采用非Merge模式编码,则采用AMVP模式编码。由于帧内匹配的机理与帧间匹配完全不同,帧内匹配的各DV之间并不一定具有很强的空间相关性,因此部分DV采用AMVP编码方案消耗的比特数比直接编码方案消耗的比特数还要多。直接编码方案是指直接编码DV是否为零位、符号位(是否为零位和符号位称为前缀)以及绝对值(后缀)。为了进一步提高编码效率,对于采用非Merge模式编码且不在N元组的当前编码DV,提出了基于区域划分与调整的DV直接编码方案。

表1给出了基于区域划分的DV前缀编码方案,对不同的区域,通过省略是否为零位和符号位的部分前缀信息,提高编码效率。其中区域1表示 DV_y 为零($DV_y = 0$)的区域;区域2表示 DV_x 为零

($DV_x = 0$) 的区域; 区域3 表示 DV_y 不为零并且 DV_x 不为零的区域, 用 $DV_y! = 0$ 且 $DV_x! = 0$ 表示。

表1 基于区域划分的 DV 前缀编码方案

Table 1 DV prefix coding scheme based on region divisions

区域分类	前缀二值化			
	DV_y 是否为 0	DV_x 是否为 0	DV_y 符号位	DV_x 符号位
区域 1 ($DV_y = 0$)	0	省略	省略	省略
区域 2 ($DV_x = 0$)	1	0	省略	省略
区域 3 ($DV_y! = 0$ 且 $DV_x! = 0$)	1	1	0 或 1	0 或 1 或省略

对于 DV 后缀的编码, 对 DV 绝对值进行调整后再采用指数哥伦布进行编码。由于调整后的 DV 绝对值比原来的 DV 绝对值更小, 采用指数哥伦布编码消耗的比特数可能减少, 从而提高编码效率。设 DV_x^{adj} 、 DV_y^{adj} 为 DV_x 、 DV_y 的绝对值进行调整后的数值, 调整方式如下:

1) 如果 $DV_y = 0$, 对于不划分的 CU ($partSize$ 为 0) 和划分成两个水平 PU 的 CU ($partSize$ 为 1), 则调整方式为

$$DV_x^{\text{adj}} = \text{abs}(DV_x) - partSize ? w : w/2 \quad (1)$$

式中, w 为 CU 的宽度, $partSize ? w : w/2$ 为三元运算符, 表示如果 $partSize$ 为 1, 则结果为 w , 否则结果为 $w/2$ 。

2) 如果 $DV_x = 0$, 对于不划分的 CU ($partSize$ 为 0) 和划分成垂直水平 PU 的 CU ($partSize$ 为 1), 则调整方式为

$$DV_y^{\text{adj}} = \text{abs}(DV_y) - partSize ? w : w/2 \quad (2)$$

基于区域划分与调整的 DV 直接编码算法的具体步骤如下:

输入: DV_x , DV_y , DV_x^{adj} , DV_y^{adj}

输出: DV 码流数据

编码 DV_y 是否为零位

IF (DV_y 为零)

 编码 DV_x^{adj} 是否为零位;

 IF (DV_x^{adj} 不为零)

 EG5 ($\text{abs}(DV_x^{\text{adj}})$);

 END IF

ELSE

 编码 DV_x 是否为零位

 IF (DV_x 为零)

 编码 DV_y^{adj} 是否为零位;

 IF (DV_y^{adj} 不为零)

 EG5 ($\text{abs}(DV_y^{\text{adj}}) - 1$);

 END IF

 ELSE

 EG1 ($\text{abs}(DV_x) - 1$);

 编码 DV_x 的符号位;

 EG1 ($\text{abs}(DV_y) - 1$);

 IF ($DV_x < 0$)

 编码 DV_y 的符号位;

 END IF

 END ELSE

 END IF

END ELSE

END IF

上述算法中, EG5、EG1 分别表示 5 阶和 1 阶指数哥伦布编码, abs 函数表示求绝对值。

3 实验结果与分析

提出的 DV 编码算法在最新 HM-16.20-SCM8.8 参考软件(JCT-VC, 2019)的基础上, 采用 C++ 语言实现。测试数据集来自 HEVC SCC 标准测试集合(Yu 等, 2017) 和 AVS2 SCC 标准测试集合(AVS 工作组, 2016)中的 17 个测试序列。本文提出的 DV 编码算法记为 IBC_DVR 算法, 最新 HEVC SCC 中 IBC 算法采用的 DV 编码算法(JCT-VC, 2019), 记为 IBC_DV 算法。

所有实验都使用全帧内(all intra, AI)、随机访问(random access, RA)和低延迟(low delay B, LB) 3 种编码配置。为了衡量算法的总体编码效率, 采用与 HEVC 的核心实验同样标准的 BD-rate 降低率(Bjontegaard, 2001) 衡量有损编码效率, 按不同的序列内容类别分别进行总体衡量和比较, 主要用每个

分量 Y、U、V 的平均 BD-rate 降低率衡量算法的增益 (负值表示增益)。

表 2 是 IBC_DV 算法和 IBC_DVR 算法编码效率率的比较。每行数据代表一个序列或一类序列。从

表 2 可知, AI 配置 TGM 序列类别的 Y 分量的平均 BD-rate 降低率为 1.04%, 意味着在相同的峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 取值下平均比特率节省 1.04%。

表 2 IBC_DV 算法与 IBC-DVR 算法编码效率比较 (BD-rate)

Table 2 Comparison of coding efficiency between IBC_DV algorithm and IBC_DVR algorithm

/%

测试序列分组	序列名称 (缩写)	有损编码配置 (IBC_DVR VS IBC_DV)								
		AI			RA			LB		
		Y	U	V	Y	U	V	Y	U	V
TGM	flyg	-0.36	-0.33	-0.15	-0.19	0.34	0.49	-0.48	-0.01	-0.44
TGM	dsk	-1.59	-1.00	-1.36	-2.16	-2.29	-2.39	-1.98	-2.02	-2.28
TGM	cns	-1.86	-2.19	-2.11	-1.04	-1.40	-1.45	-0.99	-1.36	-1.20
TGM	ce	-0.64	-0.85	-0.71	-0.58	-0.50	-0.51	-0.56	-0.45	-0.61
TGM	cde	-0.65	-0.75	-0.46	-1.36	-1.10	-0.84	-0.68	-0.77	-0.65
TGM	ede	-1.37	-1.69	-1.35	-0.83	-1.28	-1.36	-0.56	0.58	-0.68
TGM	sps	-1.86	-1.74	-1.65	-1.59	-1.51	-1.48	-1.24	-1.04	-0.91
TGM	bsa	-2.99	-2.94	-2.82	-2.71	-2.60	-2.60	-2.34	-2.37	-2.55
TGM	clp	-1.42	-1.34	-1.33	0.34	0.08	-2.06	-0.66	-0.99	-1.08
TGM	webb	-0.19	-0.23	-0.64	-0.42	-0.58	-0.21	-1.06	-0.83	-0.60
TGM	map	0.24	-0.24	-0.17	0.15	0.30	0.71	0.06	-0.04	0.18
TGM	prg	-0.92	-0.88	-0.78	-0.17	-1.66	-0.95	-1.19	-1.35	-1.80
TGM	ss	0.15	-0.46	-0.18	-0.75	-0.33	-1.13	-0.43	-0.15	0.18
MC	bbs	-0.46	-0.31	0.01	-0.41	0.33	-0.31	-0.14	-0.25	0.64
MC	mcc2	-0.58	-0.57	-0.62	-0.59	-0.75	-0.70	-0.26	0.08	-0.56
MC	mcc3	-0.58	-0.35	-0.47	-0.35	-0.66	0.15	-0.38	0.16	0.06
MC	pvs	-0.97	-1.35	-0.48	-0.68	0.91	-0.85	-0.19	1.08	-0.19
TGM 类别平均 BD-rate		-1.04	-1.13	-1.05	-0.87	-0.96	-1.06	-0.93	-0.83	-0.96
MC 类别平均 BD-rate		-0.65	-0.65	-0.39	-0.50	-0.04	-0.43	-0.24	-0.27	-0.01

注:加粗字体表示各列最优结果。

表 3 给出了 IBC_DV 算法和 IBC_DVR 算法的复杂度比较。算法复杂度分别用国际标准制定工作中通用的编码、解码运行时间的比值衡量。算法在 CPU 为 Intel(R)@ 2.3 GHz 20 核,内存为 80 GB 的服务器上运行,每次实验同时执行 17 个任务,操作系统为 windows 7(64 位)。

从以上实验结果,可以得出以下结论:
1) 从 TGM 和 MC 序列类别的平均编码效率来看,IBC_DVR 算法总体上均表现出更好的编码效

率。从表 2 可知,IBC_DVR 与 IBC_DV 相比,从平均编码效率来看,对于 TGM 数据类别,AI 配置的 Y 分量的 BD-rate 降低率为 1.04%,RA 配置为 0.87%,LB 配置为 0.93%;对于 MC 数据类别,AI 配置的 Y 分量的 BD-rate 降低率为 0.65%,RA 配置为 0.50%,LB 配置为 0.24%。

2) 从典型的单个屏幕图像序列的编码效率来看,对于部分屏幕图像序列,IBC_DVR 与 IBC_DV 算法的编码效率提升非常明显,Y 分量的 BD-rate 降

表3 IBC_DV 算法与 IBC_DVR 算法时间复杂度比较

Table 3 Comparison of complexity between IBC_DV algorithm and IBC_DVR algorithm

衡量指标	有损编码配置			/%
	AI	RA	LB	
编码运行时间比值	96.23	99.21	98.83	
解码运行时间比值	97.63	99.31	99.84	

低率最高可达 2.99%。从表 2 可知,对于 bsa 数据,IBC_DVR 与 IBC_DV 相比, Y 、 U 、 V 分量的 BD-rate 降低率 AI 配置分别为 2.99%、2.94%、2.82%;RA 配置分别为 2.71%、2.60%、2.60%;LB 配置分别为 2.34%、2.37%、2.55%。对于 dsk 和 sps 数据都有近 2% 左右的提升。对于少数序列(如 map 数据),部分分量的 BD-rate 降低率为正数,出现了编码效率反而降低的情况(尤其是 LB 配置),主要原因包括:(1)少数数据选择 IBC 模式进行编码的 CU 并不多,并且增加了标志位的比特数(用来标识 N 元组模式还是直接编码模式);(2)本文算法主要根据 DV 参数的帧内特性而提出,对 AI 配置效果比较好;在 LB 配置中,AMVP 编码模式可能对 IBC 算法的帧内帧间混合编码(部分 PU 的 DV 来自非当前帧的参考块,部分 PU 的 DV 来自当前帧的参考块)更有效,因此出现少数数据编码效率反而降低的情况;(3)在 IBC 算法中,为了达到编码速度与效率之间的均衡,DV 的选择仅与亮度分量的预测失真相关,但是 DV 模式的选择与各分量的预测失真相关,因此可能出现 Y 、 U 、 V 分量的 BD-rate 未同时降低的情况。

3)从表 3 可知,IBC_DVR 与 IBC_DV 算法相比,编解码时间复杂度基本一致。从空间复杂度来看,IBC_DVR 需要在编解码端增加 N 元组的数组,由于 N 取值为 8,空间复杂度的增加微乎其微。

4)IBC_DVR 算法与编码效率的提升程度与屏幕图像类别相关。表 2 表明,IBC_DVR 算法对于 TGM 类别提升较多,MC 类别的提升较少一些。实际上,专门针对典型屏幕图像的算法都有这一性质。

算法所涉及的源代码和实验结果可以从链接 <https://pan.baidu.com/s/1F44NgqL9Yo4a0figNm76SA> 中获得。

4 结 论

屏幕图像编码的一个关键问题是如何提高编码效率。为了进一步提高屏幕图像的编码效率,本文根据 IBC 算法中 DV 的帧内相关性和固有匹配特性,提出了自适应预测方案(基于邻近块与最近块相结合预测方案)或直接编码方案(基于区域划分与调整的直接编码方案)的 DV 编码算法。与其他 DV 编码方法相比,提出的算法充分考虑了屏幕图像的特征,包括重复样图形成的机理、DV 的匹配特性和空间相关性(包括邻近 DV 相关性和最近 DV 相关性),因此总体编码效率进一步提升。对于 HEVC SCC 和 AVS2 SCC 中的标准测试数据集合中的 TGM 与 MC 序列类别,在没有增加编解码复杂度的情况下,实验结果充分验证了提出的 DV 算法的有效性。随着屏幕内容编码技术大规模应用,屏幕共享和显示的大流量数据内容日益体现出多样化(如多屏分享)和复杂化(如高动态变化)的新特征,以屏幕为界面的强互动和个性化操作的需求也日趋重要。下一步的主要工作将围绕最新的国际视频标准 VVC 和 AVS3 等,探索屏幕图像的新特征、各种屏幕图像编码工具的新特征(包括 RDcost 特征、编码参数帧内和帧间的特征等)及其屏幕图像的特征与各种屏幕图像编码工具特征之间的内在关联,从而进一步提高屏幕内容编码的性能,满足屏幕内容编码应用的新需求。

参考文献 (References)

- AVS Group. 2016. AVS-N2282. Common test condition for screen and mixed content coding in AVS2-P2. Hangzhou: 1-4 (AVS 工作组. 2016. AVS-N2282, AVS2-P2 屏幕与混合内容视频编码 (SMCVC)通用测试条件. 杭州: 1-4)
- Bjontegaard G. 2001. ITU-T SG16 Q.6 Document VCEG-M33. Calculation of Average PSNR Differences Between RD-Curves. Austin: 1-3
- Chen J, Ye Y and Kim S. 2020. JVET-Q2002. Algorithm description for versatile video coding and test model 8 (VTM 8). Brussels: 1-92
- JCT-VC. 2019. HEVC SCC test software [EB/OL]. [2019-03-22]. https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_HEVCSoftware/tags/HM-16.20+SCM-8.8/
- Li Y M, Xu X Z, Chen Z Z, Liu S, Zhou Q Y, Zhao L P, Lin T, Zhou K L, Ye Z G, Yang Y F and Jiao M C. 2019. AVS M4859. Block-matching based screen and mixed content coding technology combi-

- ning M4766 (IBC) and M4815 (single-string mode in Universal String Prediction). Chengdu: 1-5 (李一鸣, 许晓中, 陈震中, 刘杉, 周青阳, 赵利平, 林涛, 周开伦, 叶子高, 杨玉芬, 焦孟草. 2019. AVS M4859. 融合 M4766 (IBC)、M4815 (USP 的单串模式) 的基于块匹配的屏幕与混合内容编码技术. 成都: 1-5)
- Lin T, Zhang P J, Wang S H, Zhou K L and Chen X Y. 2013. Mixed chroma sampling-rate high efficiency video coding for full-chroma screen content. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 23 (1): 173-185 [DOI: 10.1109/TCSVT.2012.2223871]
- Ma S W, Luo F L and Huang T J. 2017. Kernel technologies and applications of AVS2 video coding standard. *Telecommunications Science*, (8): 2017245 (马思伟, 罗法蕾, 黄铁军. 2017. AVS2 视频编码标准技术特色及应用. 电信科学, (8): 2017245)
- Miyazawa K Y, Akira M Z and Sekiguchi S I. 2014. JCTVC-R0074. Non-SCCE1: adaptive switching between differential and direct coding for intra block copy vectors. Sapporo: 1-3
- Pang C, Sole J, Chen Y, Karczewicz M, Xu X Z, Liu S, Chuang T D, Lei S M, Zhu L H, Xu J Z and Sullivan G J. 2014. JCTVC-R0309. Non-SCCE1: combination of JCTVC-R0185 and JCTVC-R0203//Proceedings of the 18th JCT-VC Meeting. Sapporo, Japan; [s. n.]: 1-7
- Peng W H, Walls F G, Cohen R A, Xu J Z, Ostermann J, MacInnis A and Lin T. 2016. Overview of screen content video coding: technologies, standards, and beyond. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 6(4): 393-408 [DOI: 10.1109/JETCAS.2016.2608971]
- Tourapis A M, Su Y and Singer D. 2015. JCTVC-U0142. Inter/Intra block copy unification: comments and observations. Warsaw: 1-3
- Xu X Z, Liu S, Chuang T D and Lei S M. 2015. Block vector prediction for intra block copying in HEVC screen content coding//Proceedings of 2015 Data Compression Conference. Snowbird: IEEE: 273-282 [DOI: 10.1109/DCC.2015.22]
- Xu X Z, Liu S, Chuang T D, Huang Y W, Lei S M, Rapaka K, Pang C, Seregin V, Wang Y K and Karczewicz M. 2016. Intra block copy in HEVC screen content coding extensions. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 6(4): 409-419 [DOI: 10.1109/JETCAS.2016.2597645]
- Yu H P, Cohen R, Rapaka K and Xu J Z. 2017. JCTVC-Z1015. Common test conditions for screen content coding. Geneva: 1-8
- Zhao L P, Lin T, Guo J and Zhou K L. 2019a. Universal string prediction-based inter coding algorithm optimization in AVS2 mixed content coding. *Chinese Journal of Computers*, 42 (10): 2190-2202 (赵利平, 林涛, 郭靖, 周开伦. 2019a. 基于通用串预测算法的 AVS2 屏幕混合内容帧间编码优化. 计算机学报, 42 (10): 2190-2202) [DOI: 10.11897/SP.J.1016.2019.02190]
- Zhao L P, Lin T and Zhou K L. 2017. An efficient ISC offset parameter coding algorithm in screen content coding. *Chinese Journal of Computers*, 40(5): 1218-1228 (赵利平, 林涛, 周开伦. 2017. 屏幕图像压缩中串复制位移参数的高效编码算法. 计算机学报, 40(5): 1218-1228) [DOI: 10.11897/SP.J.1016.2017.01218]
- Zhao L P, Lin T, Zhou K L, Wang S H and Chen X Y. 2016. Pseudo 2D string matching technique for high efficiency screen content coding. *IEEE Transactions on Multimedia*, 18 (3): 339-350 [DOI: 10.1109/TMM.2015.2512539]
- Zhao L P, Zhou K L, Guo J, Cai W T, Lin T and Zhu R. 2018. Pixel string matching for full-chroma screen and mixed content coding in AVS2. *Chinese Journal of Computers*, 41 (11): 2482-2495 (赵利平, 周开伦, 郭靖, 蔡文婷, 林涛, 朱蓉. 2018. 融合像素串匹配的 AVS2 全色度屏幕与混合内容视频编码算法. 计算机学报, 41 (11): 2482-2495) [DOI: 10.11897/SP.J.1016.2018.02482]
- Zhao L P, Zhou K L, Guo J, Wang S H and Lin T. 2018. A universal string matching approach to screen content coding. *IEEE Transactions on Multimedia*, 20 (4): 796-809 [DOI: 10.1109/TMM.2017.2758519]
- Zhao L P, Zhou K L, Lin T and Guo J. 2019b. A universal string prediction approach and its application in AVS2 mixed content coding. *Chinese Journal of Computers*, 42(9): 2100-2113 (赵利平, 周开伦, 林涛, 郭靖. 2019b. 通用串预测算法及在 AVS2 屏幕与混合内容视频编码中的应用. 计算机学报, 42(9): 2100-2113) [DOI: 10.11897/SP.J.1016.2019.02100]

作者简介



赵利平, 1984 年生, 女, 副教授, 主要研究方向为高效视频编码、屏幕内容编码。

E-mail: zhaoliping_jian@126.com

林涛, 男, 教授, 主要研究方向为音视频编解码算法、片上系统集成与设计。E-mail: lintao@tongji.edu.cn

杨玉芬, 女, 博士研究生, 主要研究方向为高效视频编码。

E-mail: hk_yyf@163.com

胡珂立, 男, 副教授, 主要研究方向为机器学习、图像处理、目标跟踪。E-mail: ancimoon@126.com

彭华, 男, 副教授, 主要研究方向为仿脑智能系统、人—机器人交互和机器学习。E-mail: 6195340@qq.com