

引用格式: JI Yuan, SONG Yuansheng, CHEN Yuansheng, et al. Bit-plane Motion Estimation for Digitally Driven Near-eye Display[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):0710001

季渊, 宋远胜, 陈远生, 等. 面向数字驱动近眼显示的位平面运动估计算法[J]. 光子学报, 2021, 50(7):0710001

面向数字驱动近眼显示的位平面运动估计算法

季渊^{1,2}, 宋远胜¹, 陈远生¹, 陈文栋², 穆廷洲²

(1 上海大学 微电子研究与开发中心, 上海 200444)

(2 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘 要: 近眼显示器在高分辨率和高刷新率的前提下应尽量小型化, 传统视频压缩方案难以满足需求。将人眼临界频率与偏心率的关系量化, 提出视点恰可察觉失真模型用于位平面运动估计的匹配准则。将运动估计的搜索范围优化为时间维度和灰阶维度两部分。结合人类视觉系统和概率统计分析, 新增补充匹配块替代残差数据。制定基于位平面运动估计的视频压缩方案以适配数字驱动近眼显示器, 以现场可编程逻辑门阵列为核心设计控制器并搭建系统进行验证。实验结果表明, 对低五个位平面压缩效果最均衡, 压缩比为 1.385, 数据传输量恒定, 有利于硬件设计。峰值信噪比为 37.658 dB, 结构相似度为 0.975, 还原后的图像与原图像无明显差异, 符合人眼直观感受。

关键词: 图像处理; 数据传输; 运动估计; 显示设备; 现场可编程逻辑门阵列

中图分类号: TN27

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215007.0710001

Bit-plane Motion Estimation for Digitally Driven Near-eye Display

JI Yuan^{1,2}, SONG Yuansheng¹, CHEN Yuansheng¹, CHEN Wendong², MU Tingzhou²

(1 *Microelectronics Research and Development Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

(2 *School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

Abstract: Near-eye display should be miniaturized under the premise of high resolution and high refresh rate, traditional video compression schemes can not meet the demand. The relationship between critical frequency of human eye and eccentricity is quantified, and a viewpoint just noticeable difference model for matching criteria of bit-plane motion estimation is proposed. Search range of the motion estimation is optimized into two parts: time dimension and gray scale dimension. Combined with the human visual system and probability statistical analysis, supplementary matching blocks are added to replace the residual data. A video compression scheme based on bit-plane motion estimation is developed for digitally driven near-eye displays, a controller is designed with field programmable gate array as the core and a system is built for verification. The experimental results show that the compression effect on the lower five bit-planes is the most balanced, the compression ratio is 1.385, and the data transmission volume is constant, which is beneficial to hardware design. The peak signal to noise ratio is 37.658 dB, and the structural similarity is 0.975. There is no obvious difference between the restored image and the original image, which is in line with the intuitive perception of the human eye.

Key words: Image processing; Data transmission; Motion estimation; Display devices; Field programmable gate array

OCIS Codes: 100.2000; 230.0250; 330.4595; 110.2990

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61674100, 61774101), 军民融合发展专项(No.2019-jmrh1-kj37)

第一作者: 季渊(1980—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为有机发光微显示, 集成电路设计。Email: jiyuan@shu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-28; 录用日期: 2021-03-25

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近眼显示器^[1]是一种位于人眼附近,由光学系统放大形成大视场的新型显示器,可用于穿戴式显示场景,例如虚拟现实(Virtual Reality, VR),增强现实(Augmented Reality, AR)领域所使用的头盔和眼镜。为进一步提升用户体验,近眼显示器应具备更高的分辨率和刷新率,设备小型化,轻量化,便于佩戴^[2]。高分辨率和高刷新率意味着海量数据将被传输和存储,不仅使带宽传输压力倍增,还导致硬件资源的浪费。针对该问题,利用运动估计技术对视频数据压缩的方案^[3-4]被广泛采用。然而,传统的运动估计视频压缩方案并不适配数字驱动近眼显示器。数字驱动方式通过改变亮暗时间长度来产生灰度,其产生的图像噪声低、灰度等级高、色彩丰富,在近眼显示领域中倍受青睐。数字驱动近眼显示器一般采用子场扫描法^[5-6]按位平面子空间扫描显示,传统视频压缩方式并不按位平面编解码,需要一次性缓存一帧视频数据,这会增加接收端存储面积开销,与设备小型化需求相违背。

鉴于此,本文采用位平面压缩方式。在压缩前对视频数据按位平面拆分,对拆分后的数据运动估计编码传输,接收端解码的位平面数据可直接用于子场扫描。这有效地减少了接收端硬件面积开销,更适配数字驱动近眼显示器的工作方式。本文将人眼临界频率与偏心率的关系进行量化,提出了视点恰可察失真(Viewpoint Just Noticeable Difference, VJND)模型用于位平面运动估计的匹配准则中。通过对视频数据相关性的实验统计,结合近眼显示器超高刷新率的特点,将运动估计的搜索范围优化成时间维度和灰阶维度的两个小菱形。最后,新增补充匹配块代替残差数据,使数据传输量减少且恒定。本文制定基于位平面运动估计的视频压缩方案,用现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)完成控制器设计并搭建系统验证其可行性,该方案对数字驱动近眼显示器编解码模块的设计有一定参考作用。

1 位平面运动估计

运动估计^[7-8]是视频压缩领域的重要技术,根据作用域的不同可分为频域和空域两大类。空域的运动估计大体可分为块匹配法、像素递归法、光流法、贝叶斯法。其中,块匹配算法因易于软硬件实现的特点被广泛采用。块匹配算法的基本原理如图1所示,设当前帧中的待匹配块为 A ,对应于参考帧中的相同位置区域为匹配块 B ,且在参考帧中以 B 为中心的搜索范围设定为 C 。块匹配的过程就是根据匹配准则在搜索范围 C 中寻找一个与 A 最相似的匹配块 D , A 到 D 的坐标偏移 V 即运动矢量。发送端对运动矢量和残差编码传输,接受端根据运动矢量和残差进行补偿还原,可有效降低数据传输量。本文采用位平面块匹配运动估计算法,针对数字驱动近眼显示器的特点,对块匹配运动估计的匹配准则,搜索范围,残差进行优化。

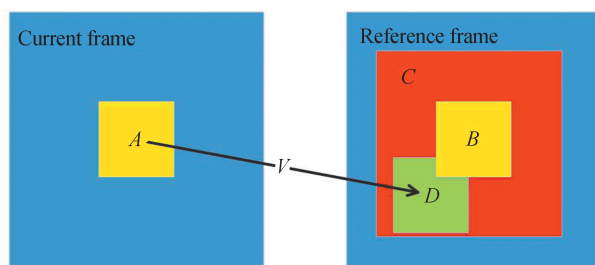


图1 块匹配运动估计算法

Fig. 1 Block matching motion estimation algorithm

1.1 匹配准则

人眼临界频率表示人眼所能感知的频率阈值,高于人眼临界频率的高频信息人眼不能察觉。文献[1]介绍了人眼临界频率与偏心率的关系,如图2所示。视点中心处人眼的临界频率最大,随着偏心率的增加,人眼临界频率向两边急剧衰减。人眼的可视角度为 124° ,集中注意力时约为其 $1/5$,即 25° ,大于 25° 的可视区域即为非视点区域。由图2可得,非视点区域的高频信息人眼难以察觉。

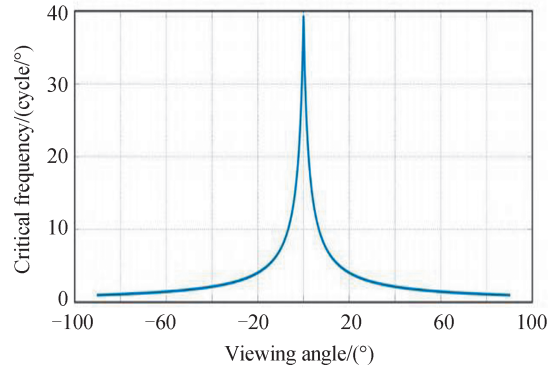


图2 人眼临界频率与偏心率的关系

Fig. 2 The relationship between critical frequency of human eye and eccentricity

图3为Lena及其各个位平面频谱图。以该图为例,图片的高位平面总是以低频分量为为主,低位平面则富含大量的高频分量。结合文献[1]的研究可得,非视点区域的低位平面数据(多是图像细节和噪声)如若发生变化,人眼通常难以察觉。

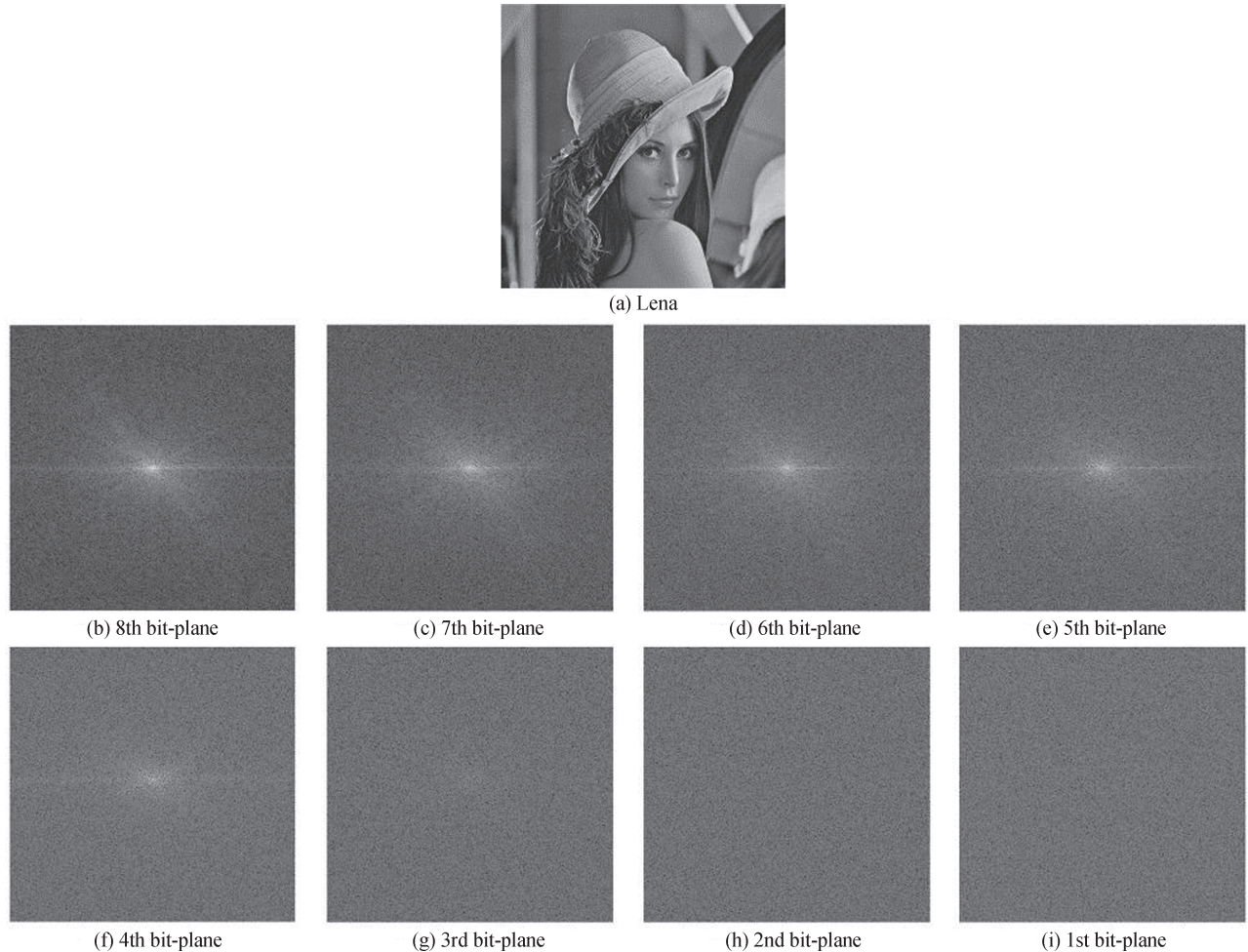


图3 Lena及其位平面频谱图

Fig. 3 Lena and its bit-plane spectrogram

人类视觉系统对于图像的感知是非均匀和非线性的,不被察觉的图像信息即是视觉冗余^[9]。消除视觉冗余需对人类视觉系统(Human Visual System, HVS)^[10]进行研究,研究者们使用恰可察失真(Just Noticeable Difference, JND)^[11]模型来模拟HVS的主要特性,最终得到人眼的最低视觉门限阈值,当变化值

低于阈值时,人眼将无法觉察出该变化。

传统 JND 模型^[12]主要考虑亮度和掩蔽特性对人眼的影响,并不包含视点因素。因此,本文将视点设定在图像中央,由图 2 中人眼临界频率与偏心率的曲线变化趋势,将图像根据偏心率划分为五个区域如图 4 所示, x 为偏心率。在图 4 所划分的各个区域内,分别使图像数据出现大小不等的噪声,统计人眼对不同区域,不同大小噪声的感知情况。

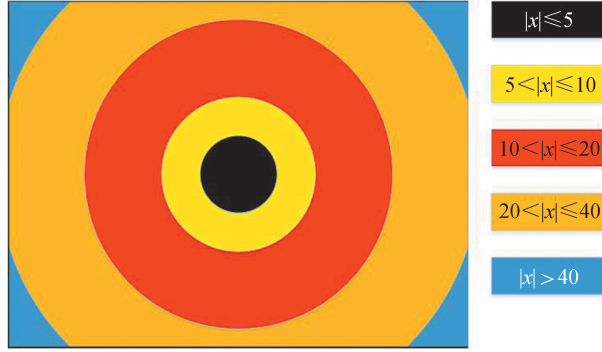


图 4 按偏心率对图像区域划分
Fig. 4 Divide the image area by eccentricity

经过大量实验统计,得出仅考虑视点因素的 JND 阈值如式(1)所示,在此基础上与传统 JND 模型相结合,得出如式(2)所示的 VJND 模型。其中, x 为偏心率, JND_{th} 即为传统 JND 模型所得阈值, JND_v 为视点因素量化后的阈值。

$$JND_v = \begin{cases} 0 & |x| \leq 5 \\ 1 & 5 < |x| \leq 10 \\ 3 & 10 < |x| \leq 20 \\ 7 & 20 < |x| \leq 40 \\ 15 & |x| > 40 \end{cases} \quad (1)$$

$$VJND = JND_{th} + JND_v \quad (2)$$

匹配准则是检验块相似程度的重要标准。本文将 VJND 模型映射至位平面,映射关系如式(3)所示,最终得出用于位平面运动估计的匹配准则如式(4)所示。其中, S 为匹配点数, A_k 为第 k 位平面待匹配块, B_k 为第 k 位平面匹配块, C_k 为第 k 位平面 VJND 阈值块,块的大小均为 3×3 。

$$C = \begin{cases} 00000000B & VJND = 0 \\ 00000001B & 1 \leq VJND < 3 \\ 00000011B & 3 \leq VJND < 7 \\ 00000111B & 7 \leq VJND < 15 \\ 00001111B & 15 \leq VJND < 31 \\ 00011111B & 31 \leq VJND < 63 \\ 00111111B & 63 \leq VJND < 127 \\ 01111111B & 127 \leq VJND < 255 \\ 11111111B & VJND = 255 \end{cases} \quad (3)$$

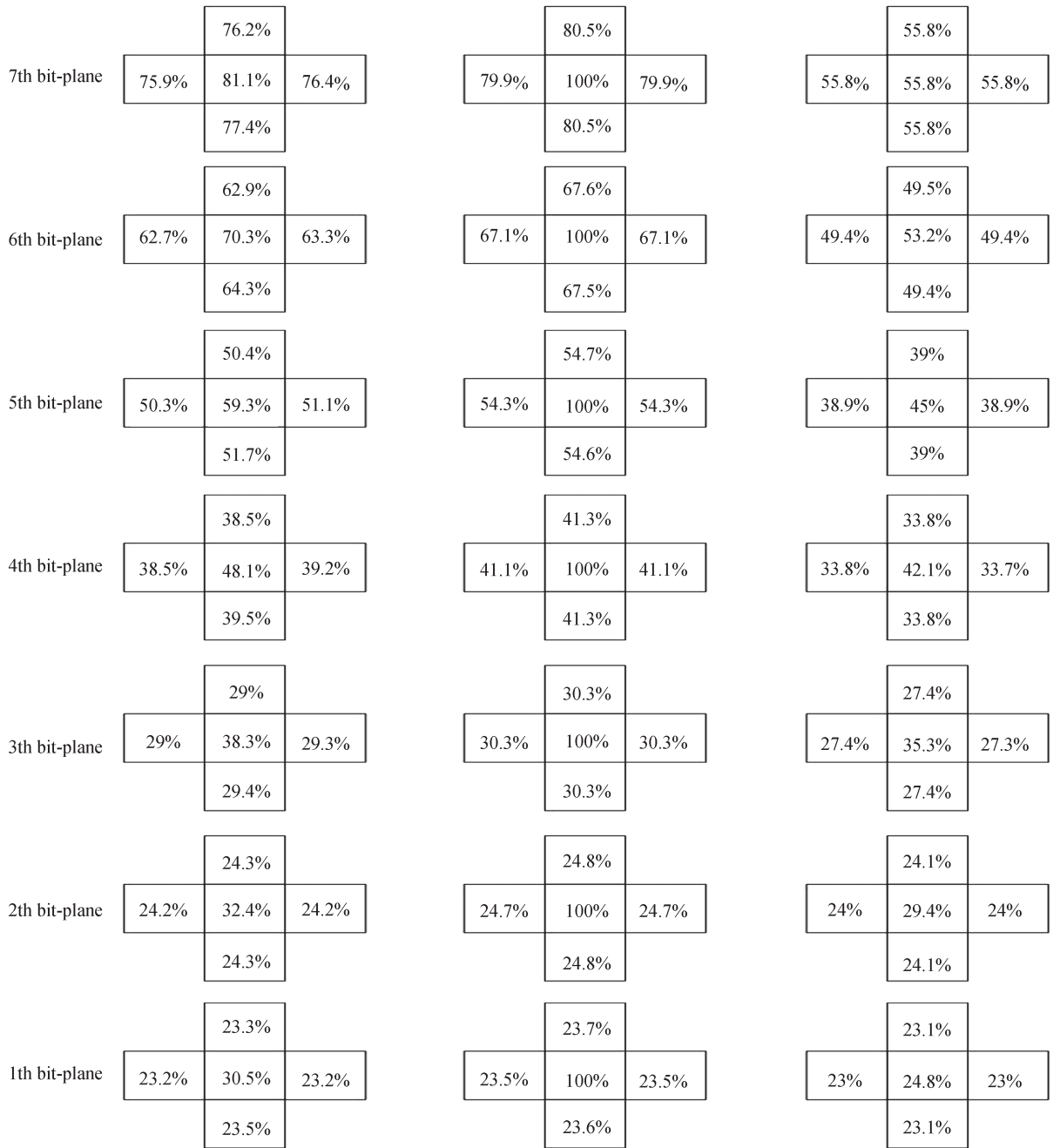
$$S = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 [A_k(i,j) \odot B_k(i,j) | C_k(i,j)] \quad (4)$$

根据式(4),匹配块与待匹配块的相似性判定不止依据两个矩阵各个元素相同的个数,还要考虑人眼对该元素是否敏感。若人眼对此不敏感,则两元素即使不相同也可判定为相同,因为在人眼观察下实际效果是相同的。

1.2 搜索范围

搜索范围的选择对运动估计的速度和准确性有极大的影响,常用的方法有新三步法、新四步法、菱形搜

索法^[13]。搜索范围确定的理论依据是视频信息具有的时空相关性,本文选取 foreman、bow 等常用视频测试序列和一些高帧率视频序列组成测试库,从中抽取总计 20 个视频片段,对方块在时间、空间、灰阶的相关性进行实验统计,结果如图 5 所示。



(a) The current bit-plane of the previous frame (b) The current bit-plane of the current frame (c) The previous bit-plane of the current frame

图 5 图像块的相关性实验统计
Fig. 5 Correlation experiment statistics of image blocks

图 5 中每个匹配块中的数据表示该匹配块与待匹配块相同的概率,第二列菱形正中间的匹配块即是待匹配块,所以相同的概率为 100%。每一行分别为待匹配块对应的上一帧当前位平面,待匹配块所在的当前帧当前位平面,待匹配块所在的当前帧的上位平面的三个菱形。第 8 位平面不存在上一位平面,所以本次统计不包含第 8 位平面的统计,总计有 7 行。由图可知:

- 1) 横向划分相关性强弱。第二列 > 第一列 > 第三列,即相关性空间 > 时间 > 灰阶,但即使是灰阶,相关

性程度也很高。

2) 纵向划分相关性强弱。位平面越高,相关性越高。

3) 针对每一个菱形。图像块的相关性从中心向四周随着距离的增加逐渐减弱,并且存在高度的对称性,第二列和第三列尤为明显。对于第一列,图像的前一帧相对当前帧通常有所变化,所以对称性略弱。

当视频数据按照位平面压缩还原时,数据会按位平面依次传输,使用同一帧上一层位平面数据还原当前层位平面数据是可行的。因此,在位平面运动估计中搜索范围应包括当前帧的上一层位平面,这可以提高匹配准确度,进而提升还原后的图像质量。

考虑到近眼显示器超高刷新率的特点^[14],搜索范围可以按比例缩小。最终,本文将位平面运动估计的搜索范围优化为两个菱形,包括前一帧同一位平面上下左右和中心,当前帧上一层位平面上下左右和中心总计10个匹配块。

1.3 残差

运动估计一般通过运动矢量和残差数据还原图像,但对于位平面运动估计,每一个位平面的匹配都会产生残差值,残差数据有时甚至比原视频数据还要多,无法起到压缩作用。根据1.1节对HVS的研究可以得出,当残差值小于JND阈值时人眼是难以察觉的。因此,本文提出补充匹配块的概念,在搜索范围的10个匹配块的基础上额外增加匹配块,使得出的最相似匹配块与待匹配块的残差值尽可能小于JND阈值,因而不必传输。 3×3 的位平面方块总计有512种情况,本文再次抽取测试库中的20个视频片段,对512种情况出现的概率进行统计,图6为各个位平面中出现概率最高的12种情况及其概率。

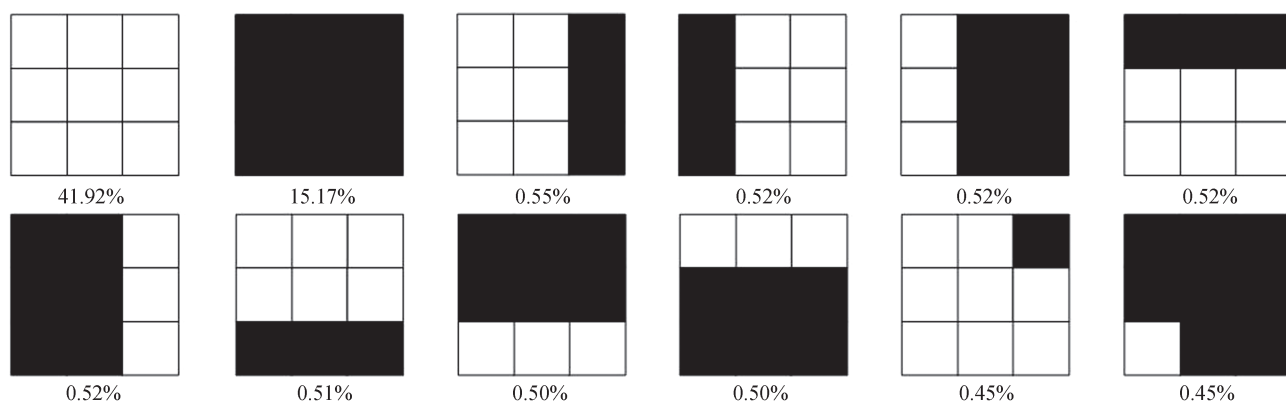
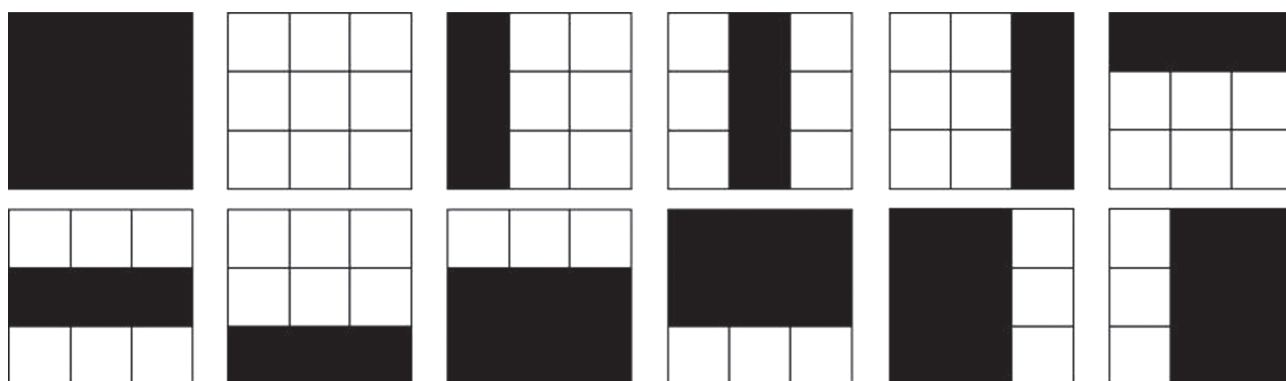


图6 位平面各匹配块图形出现的概率前12

Fig. 6 The top 12 of each matching block pattern in the bit-plane

图6中白色代表位平面数据为0,黑色代表位平面数据为1。可以看出,位平面的视频数据全0和全1的概率接近60%,剩下的510种情况出现概率极小。对于第11种和第12种图形,分别用全0和全1代替,相当于引入微量的噪声,高于人眼JND阈值的概率极小,即第1种和第2种图形在多数情况下可以代替第11和第12种图形,人眼不易察觉。经过大量比对实验,本文在出现概率较高的情况中筛选出22种主观上最具代表性的补充匹配块如图7所示。



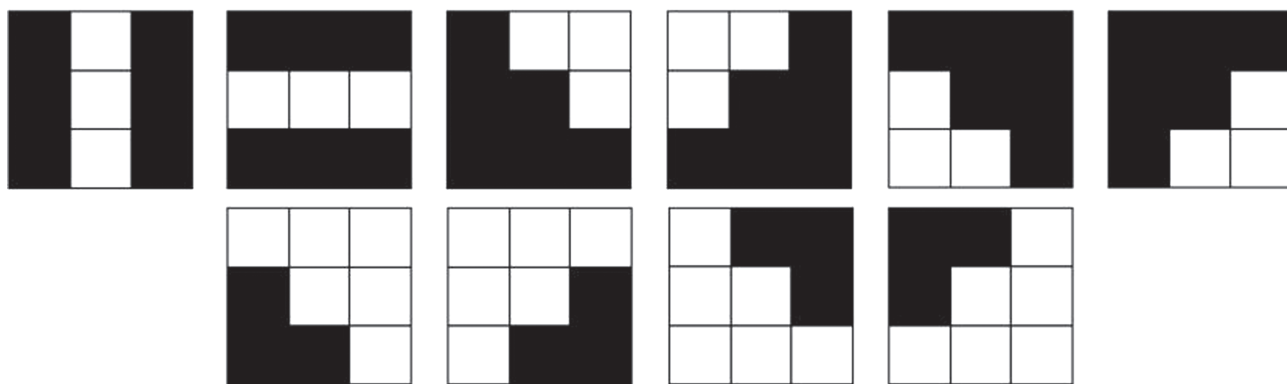


图7 补充匹配块

Fig. 7 Supplementary matching block

1.4 基于位平面运动估计的视频压缩方案

针对数字驱动近眼显示器的特点,提出的基于位平面运动估计的视频压缩方案中,每一层位平面的处理步骤如下:

1) 搜索范围为上一帧当前层和当前帧上一层对应位置的两个小菱形各5个匹配块,外加22个补充匹配块,总计32个匹配块。

2) 求出当前帧的VJND阈值,利用式(4)给出的匹配准则,在32个匹配块中选取最相似的方块。

3) 匹配后的结果总共32种情况,采用5比特编码传输,接收端利用5比特码字索引上一帧当前层,当前帧上一层和补充匹配块进行还原。

4) 第8位平面不存在上一层位平面,所以搜索范围只有27个匹配块,其余一致。

本文所提方案,任一位平面的压缩比均为9:5。根据压缩位平面的数量不同,压缩比统计如图8所示。压缩位平面的数量越多,压缩比越大,带宽传输压力越小。对于硬件压缩方案,恒定的压缩比有助于硬件设计。相对的,如果压缩比可变,则方案制定中总是要留足余量,给硬件设计带来了极大困难,因此本文提出的方案更适于硬件压缩。

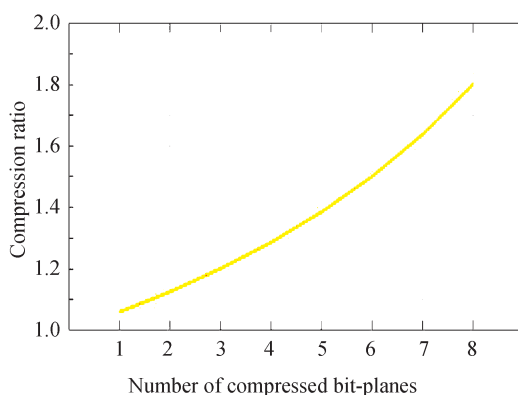


图8 压缩位平面数量与压缩比的关系

Fig. 8 The relationship between the number of compressed bit-planes and the compression ratio

本文使用Matlab对所提出的位平面压缩方案进行软件实现,选取峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和结构相似度(Structural Similarity, SSIM)作为客观图像质量评价标准^[15]。通过保持其他位平面不变,仅对某一位平面进行压缩还原的方式,来研究所提方案在各个位平面中的实际效果,得出的实验结果如图9~10所示。

图9~10的横坐标均为所压缩的位平面,纵坐标为经过实验统计后的平均PSNR和SSIM值。可以看出,当仅对一个位平面压缩还原时,压缩的位平面越高,PSNR和SSIM值越小,即还原后的图像质量越差,

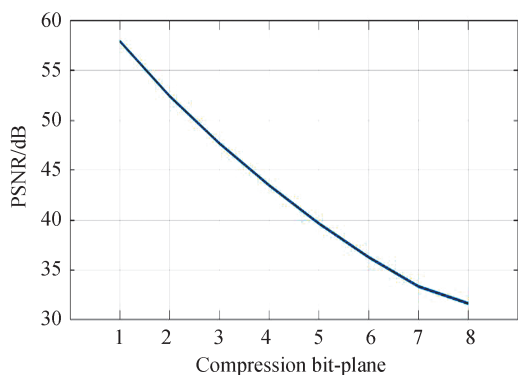


图9 单一位平面压缩还原后的PSNR

Fig. 9 PSNR after single bit-plane compressed and restored

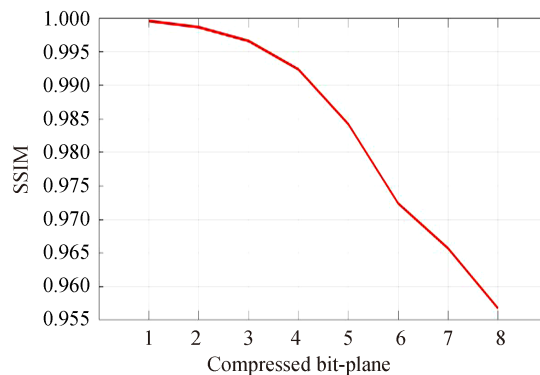


图10 单一位平面压缩还原后的SSIM

Fig. 10 SSIM after single bit-plane compressed and restored

主观图像质量评价同样印证了这一现象,越高位平面压缩还原后出现噪声的概率越大,如图11所示。究其原因,高位平面图像数据的权值极大,即使通过补充匹配块尽量消除缺失残差数据所引起的数据变动,仍有高于人眼JND阈值的情况存在。



图11 单一位平面压缩还原后的图像主观质量评价

Fig. 11 Subjective quality evaluation of image after single bit-plane compression

综合图8~11,对任一平面进行压缩,压缩比是相同的。压缩的位平面越低,还原后的图像质量越好,即压缩位平面数量相同时,从最低位平面开始压缩,还原后的图像质量是最优的。

2 硬件实现

基于提出的位平面压缩方案,以FPGA为核心进行了各个模块的IP核设计,控制器主要由帧缓存、预处理、发送、接收和扫描显示五部分构成,如图12所示。其中,发送的实际操作是存储在FPGA的RAM里,接收端接收数据是从RAM中读取数据。

帧缓存模块在满足时序要求的情况下,准备好当前帧、上一帧,由VJND模型映射至位平面的JND帧。VJND阈值的计算包含大量的卷积和乘除法,硬件实现复杂且精确度低,本文采用软硬件结合的方式,利用软件语言求出VJND阈值存储在RAM中,以供后续硬件电路使用。

预处理模块将上一模块的数据按位平面拆分,输出时钟八倍频,输出顺序为从左至右,从上到下,从高位到低位平面,输出的数据接入一个三层的移位寄存器以获取 3×3 的方块。运动估计所需总计32个匹配块,22个补充匹配块存储在查找表里,剩余10个方块并不能同时得到,因此还需要多次缓存。当32个匹配

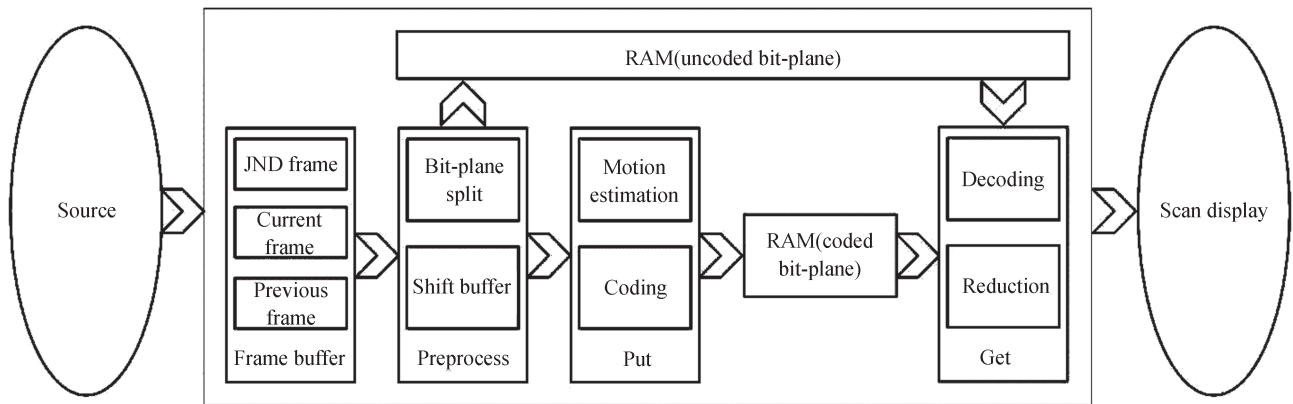


图 12 基于位平面运动估计的近眼显示器

Fig. 12 Near-eye display based on bit-plane motion estimation

块都得到,运动估计模块按照匹配准则并行匹配,同时得出 32 个匹配结果并通过比较,得出最相似匹配块,5 比特编码后传输。

解码模块同样需要缓存和预处理准备好 32 个匹配块,方式与接收端相同不再赘述。32 个匹配块准备好后,索引存有压缩后数据的 RAM 来决定用哪个匹配块来还原位平面数据。并非所有位平面都需要压缩还原,对于未压缩的位平面数据在位平面拆分操作后可直接存储在 RAM 中供接收端读取,用于扫描显示和其他位平面的解码。

本次设计所使用的硬件测试平台为 NE-7K-325/410T-IMG,内置 Xilinx Kintex-7 FPGA,该 FPGA 总计 326 080 个逻辑单元,500 个 I/O 引脚,硬件测试平台如图 13 所示。

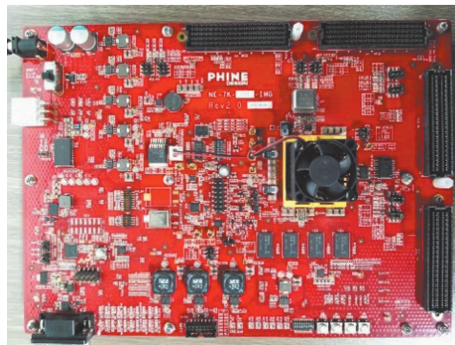


图 13 硬件测试平台

Fig. 13 Hardware test platform

3 实验结果分析

从第 1 位平面开始,增加压缩位平面的数量,对多个位平面压缩还原后的图像质量进行统计,结果如图 14~15 所示。

图 14~15 的横坐标均为从第 1 位平面开始,压缩位平面的数量。对比图 9 和图 14、10 和 15,对第 n 个位平面压缩还原的图像质量 > 对 n 个位平面压缩还原的图像质量 > 对第 $n+1$ 个位平面压缩还原后的图像质量。对比图 14 和图 15,压缩低 6 个及以上的位平面,PSNR 不足 35 dB, SSIM 不足 0.97,客观图像质量评价下结果较差。

综合图像质量和压缩比可得,压缩比与图像质量成反比,不存在使二者都达到最优的情况。在保证图像质量的前提下,最合理的策略是对第 1,2,3,4,5 总计 5 个位平面进行压缩,压缩还原后的主观效果如图 16 所示。此时压缩比恒定为 1.385,传输数据量仅为原来的 72.22%。平均 PSNR 为 37.658 dB,平均 SSIM 为 0.975。实际观测下,还原后的图像与原图像无明显差异,渲染效果良好,符合人眼直观感受。

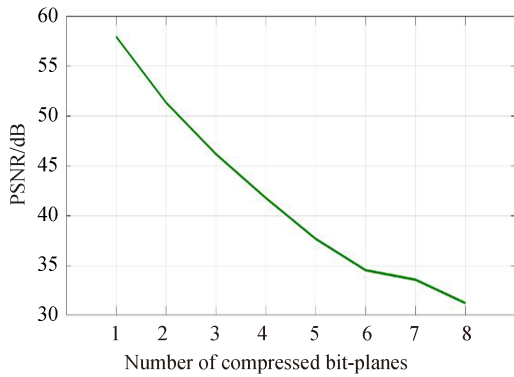


图 14 从低位开始,多个位平面压缩还原后的 PSNR

Fig. 14 Starting from the low bit, PSNR of multiple bit-planes compressed and restored

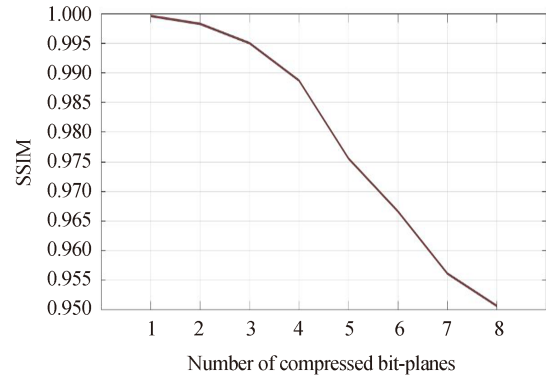


图 15 从低位开始,多个位平面压缩还原后的 SSIM

Fig. 15 Starting from the low bit, SSIM of multiple bit-planes compressed and restored



(a) Original image

(b) Restored image

图 16 从低位开始,5个位平面压缩还原后的图像主观质量评价

Fig. 16 Starting from the low bit, subjective quality evaluation of the image after 5 bit-planes compression and restoration

4 结论

本文针对数字驱动近眼显示器的工作方式,将视频数据按位平面压缩,制定一种基于位平面运动估计的视频压缩方案。将人眼临界频率与偏心率的关系进行量化,提出了考虑视点因素的VJND模型并将其映射至位平面,用于位平面运动估计的匹配准则中。通过对视频数据相关性实验的分析,将运动估计的搜索范围优化为时间维度和灰阶维度的两个菱形。最后,去除对残差数据的传输,新增补充匹配块以弥补所引起的图像质量降低,并使传输数据量降低且恒定。本文使用现场可编程门阵列进行近眼显示器控制器设计并搭建系统对其验证。结果表明,该方案满足近眼显示设备对于高分辨率、高刷新率和设备小型化的要求,恒定的压缩比有利于硬件实现,对低5个位平面压缩还原后的图像质量较好,符合实际应用需求,对数字驱动近眼显示器编解码模块设计有一定借鉴意义。

参考文献

- [1] JI Yuan, GAO Qin, YU Yunsen, et al. OLED-on-Silicon microdisplay controller based on multi-scale pyramid[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1223001.
季渊, 高钦, 余云森, 等. 基于多尺度金字塔的硅基 OLED 微显示控制器[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1223001.
- [2] JI Yuan, YU Yunsen, Gao Qin, et al. System of OLED-on-silicon micro display based on visual perception of human eye [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 0411001.
季渊, 余云森, 高钦, 等. 基于人眼视觉特性的硅基 OLED 微显示器系统[J]. 光子学报, 2019, 48(4): 0411001.
- [3] 王江林. H.266/VVC 高效色度编码算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [4] SULLIVAN G J, OHM J R, HAN W J, et al. Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2013, 22(12): 1649-1668.
- [5] JI Yuan, WANG Chengqi, CHEN Wendong, et al. Atomic scanning strategy of OLED micro-display [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(4): 998-1005.
季渊, 王成其, 陈文栋, 等. OLED 微显示器的原子扫描策略[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 998-1005.

- [6] ZHANG Chunyan, CHEN Wendong, JI Yuan, et al. Design of atomic scan controller based on OLED microdisplay[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2019, 34(4): 395-401.
张春燕, 陈文栋, 季渊, 等. 基于OLED微显示器的原子扫描控制器设计[J]. 液晶与显示, 2019, 34(4): 395-401.
- [7] CHEN H, DING J, LEE Y. Novel adaptive rood path searches with small motion prejudgetments for fast block motion estimation[C]. Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, 2018:560-563.
- [8] AHMADI M, WALI A, WALHA A, et al. A new motion estimation technique for video coding [C]. International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2015:110-115.
- [9] 吉万清. 基于视觉特效的高效视频编码技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017.
- [10] 陈晨. 基于视觉感知的图像质量评价方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
- [11] 王浩. 基于视觉特性的HEVC视频编码优化研究[D]. 上海:上海交通大学, 2019.
- [12] 曾志鹏. JND模型及其在HEVC感知视频编码的应用[D]. 泉州:华侨大学, 2019.
- [13] HAMID N A, DARSONO A M, MANAP N A, et al. Adaptive diamond orthogonal search algorithm for motion estimation[C]. International Conference on Computer, Communications, and Control Technology, 2015:98-501.
- [14] 陈义安. 基于FPGA的三维立体腹腔镜实时显示系统设计[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- [15] WANG S Q, REHMAN A, WANG Z, et al. Rate-SSIM optimization for video coding[C]. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2011:833-836.