

文章编号 1004-924X(2014)02-0451-08

基于双目视觉特性的立体视频编码码率控制算法

蒋刚毅^{1,2*}, 廖 义¹, 郁 梅¹, 邵 枫¹, 王晓东¹, 李福翠¹, Yo-Sung Ho³

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;

2. 南京大学 计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏 南京 210093;

3. School of Information and Communications, Gwangju Institute of Science and Technology, Korea)

摘要:为了使立体视频中的比特分配更加符合人眼视觉感知特性,提出了一种非对称质量的立体视频编码码率控制算法。首先,建立了左右帧的码率分配比例与量化参数差值之间的立体指数 RRQ(Rate-ratio Quantization)模型。然后,将码率控制算法分为 SGOP(Stereoscopic Group of Pictures)层、立体图像对层和帧层等 3 个码率控制层。在 SGOP 层计算每个 SGOP 的目标码率和关键帧的量化参数;在立体图像对层根据剩余比特数和缓冲区饱和度计算每个立体图像对的目标比特;在帧层则通过分析双目视觉掩蔽效应,用一种适合于立体视频的率失真优化方法合理分配左右帧的目标码率。实验结果表明,本文算法的码率控制偏差平均值为 0.21%;立体视频客观质量比对称质量算法和 Wang 的算法分别提高了 0.23 dB 和 0.06 dB,且质量波动较为稳定。因此,该算法基本满足网络带宽传输要求。由于充分利用了人眼双目视觉特性,可满足人们对立体视频的视觉需求。

关键词: 立体视频;码率控制;双目视觉冗余;非对称质量

中图分类号: TN919.8; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0451

Rate control algorithm for stereoscopic video coding based on binocular visual characteristics

JIANG Gang-yi^{1,2*}, LIAO Yi¹, YU Mei¹, SHAO Feng¹,WANG Xiao-dong¹, LI Fu-cui¹, HO Yo-Sung³

(1. Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. National Key Laboratory of Software New Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. School of Information and Communications, Gwangju Institute of Science and Technology, Korea)

* Corresponding author, E-mail: jianggangyi@126.com

Abstract: To allocate bitrates more satisfactory with human visual characteristics, a new rate control algorithm was proposed for an asymmetric quality stereoscopic video coding. Firstly, an exponent model(Rate-ratio Quantization, RRQ) between the rate ratio and the difference between quantization parameters of left and right frames was established. Then, the algorithm was performed on three levels, namely Stereoscopic Group of Pictures (SGOP) level, stereoscopic image pair level and frame level. The target bits for each SGOP and the quantization parameter of each key frame were calculated in

收稿日期:2013-06-21;修订日期:2013-08-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61271270, No. U1301257, No. 61271021, 61311140262);科技部国家科技支撑计划资助项目(No. 2012BAH67F01)

the SGOP level, the total target bits for each stereoscopic image pair were calculated according to the remaining bits in the SGOP and the current buffer occupancy in the stereoscopic image pair level, and by utilizing the binocular masking, a stereoscopic rate distortion model was used to allocate bitrates for the left and right frames more rationally in the frame level. Experimental results show that the proposed algorithm can control the bitrates error within 0.21% on average. Meanwhile, it has improved the stereoscopic video objective quality by 0.23 dB and 0.06 dB as compared with the symmetric quality algorithm and Wang's algorithm, respectively, so that it can provide more stable video quality fluctuation. In conclusion, the proposed algorithm has effective network transmission bandwidth, and can satisfy the requirements of human for stereoscopic video by utilizing the human binocular visual characteristics.

Key words: stereoscopic video; coding rate control; binocular visual redundancy; asymmetric quality

1 引言

随着多媒体通信技术的快速发展以及人们对视觉需求的不断提高,立体视频逐步走入人们的生活。与传统的二维视频技术相比,立体视频技术能够利用人眼的双目视觉原理,给人带来强烈的深度感和交互性,满足人们对视频真实感的要求。立体视频技术的应用范围已经覆盖了宽屏娱乐、远程立体视频会议、精密仪器检测等多个领域^[1-2]。与传统的单通道视频不同,立体视频一般有 2 个视频通道,其数据量要远远大于单通道视频。所以,在立体视频的发展过程中,高效的编码和码率控制技术显得尤为重要^[3-5]。

现有的立体视频码率控制主要是针对双目视觉冗余进行的左右非对称质量比特分配。Liu 等人^[5-6]提出了一种非对称质量的编码方法。通过对左右视点帧以 GOP(Group of Pictures)为单位进行交替下采样,将降质程度平均分配到两个视点中,Lu 等人^[7]根据左右视点对整体视频质量影响权重的不同,将立体视频编码结构的帧分为 6 种类型,并赋予不同的权重系数,再根据权重系数进行码率分配。其权重系数通过失真度与量化参数的线性模型来计算,因此,使立体视频客观质量得到了较大的提升。Wang 等人^[8]提出了一种计算复杂度较低的帧层码率控制算法,它将左右视点加权的视频质量量度(Video Quality Metric, VQM)作为立体视频失真度,并以此建立率失真(Rate Distortion, RD)模型来指导比特分配,但是该算法并没有考虑视频质量的波动,也没有充分

利用双目视觉冗余。此外,Mobile 3DTV 采用了彩色联合深度的码率控制方法^[9],这种方法可以节省码率。但是在解码端合成的虚拟视点存在着较大的空洞区域。Chang 等人^[10]对左右视点分别采用 MPEG-2 和 H.264/AVC 进行编码,并建立了一种基于梯度的视点间的量化失真(Distortion Quantization, DQ)模型,进一步优化视点间的比特分配,但是它并没有考虑人眼的视觉特性。

本文首先分析了人眼双目视觉特性和适合于立体视频质量评价的方法;其次,通过统计分析左右帧之间码率比例与量化参数差值之间的关系,建立了一个立体指数(Rate-ratio Quantization)RRQ 模型;最后,在双目掩蔽阈值和视频质量稳定性的约束下,求取最佳的左右帧量化参数,并合理分配左右帧的比特。

2 双目视觉特性与立体指数 RRQ 模型

2.1 双目视觉特性

视觉心理学研究表明人眼双目视觉中存在掩蔽效应^[11]。Ozbek 等人^[12]的研究指出,立体视频的质量取决于质量较高通道的质量,即较差质量的通道在人眼观看时会被质量较高的通道所掩盖。Zhao 等人^[13]通过模拟亮度掩蔽效应和对比度掩蔽效应建立了双目恰可察觉差异(Binocular Just Noticeable Difference, BJND)的失真模型,并证明了当左右图像的失真差异小于 BJND 值时,人眼不会察觉。Wang 等人^[14]通过主观实验描述了双目心理视觉冗余,并建立了左右图像失真差异的允许阈值与编码量化参数之间的关系模型。

由于立体视频的主观质量是由质量较高的通道来决定的,文献[7,12]将左、右视点分别定义为主、辅视点,并将两者加权对立体视频质量进行客观评价:

$$Q_v = w \times PSNR_L + (1-w) \times PSNR_R, \quad (1)$$

其中: Q_v 表示立体视频质量, $PSNR_L$ 和 $PSNR_R$ 分别表示左、右视点的 PSNR, w 的取值为 $2/3$ 。

因此,立体视频的比特分配问题即为在左、右视点总码率一定下获取最佳的视频质量,其率失真优化模型可以描述为:

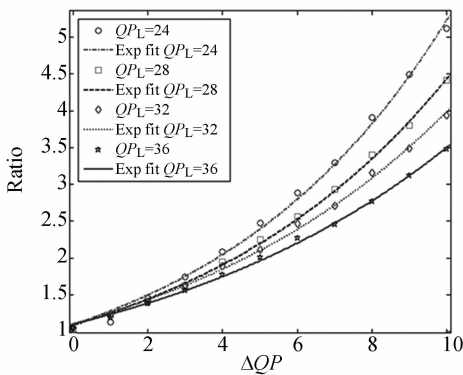
$$\begin{aligned} \max Q_v \\ \text{s. t. } R_L + R_R \leq R_T \end{aligned}, \quad (2)$$

其中: R_L 和 R_R 分别为左、右视点的码率, R_T 为整体目标码率。

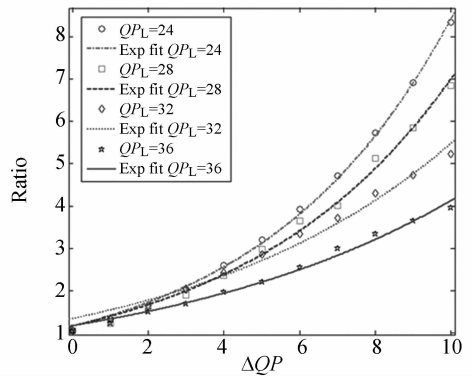
不难看出,利用双目视觉冗余给视觉权重较高的视点分配更多的比特,可以提高立体视频质量。

2.2 立体指数 RRQ 模型

为了充分利用人眼双目视觉冗余,合理分配左右帧的码率,本文探索了左右帧之间码率分配比例 Ratio 与左右帧的量化参数差值 ΔQP 之间的关系。对标准视频测试序列 Akko(640×480) 和 Booksale(320×240) 进行测试,采用 4 组不同的左帧量化参数 QP_L (分别为 24、28、32 和 36) 和 11 组不同的 ΔQP (从 0 到 10, 步长为 1) 进行编码。图 1(a)、1(b) 分别为对 Akko 和 Booksale 进行编码的指数拟合图。表 1 为 2 个序列在各个 QP_L 下用指数拟合的拟合优度 R -square, 如果 R -square 越接近 1, 说明拟合曲线的可靠性越高。从表 2 可以看出, 用该指数模型进行拟合的各个 R -square 值均在 0.98 以上, 拟合精度较高。



(a) Akko 的结果
(a) Results of Akko



(b) Booksale 的结果
(b) Results of Booksale

图 1 Ratio 与 ΔQP 在不同 QP_L 下的指数拟合
Fig. 1 Exponential fitting between Ratio and ΔQP at different QP_L

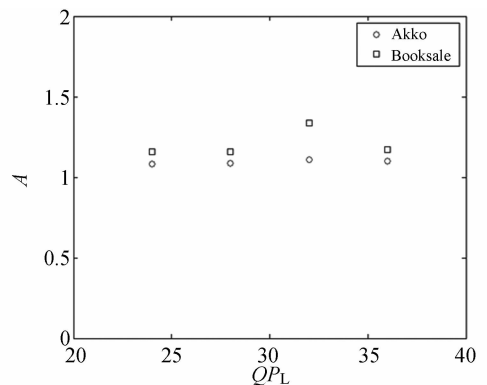
表 1 各个 QP_L 下的拟合优度
Tab. 1 R-squares at different QP_L

序列	QP_L			
	24	28	32	36
Akko	0.995 4	0.998 5	0.997 8	0.998 0
Booksale	0.998 7	0.994 6	0.984 0	0.989 6

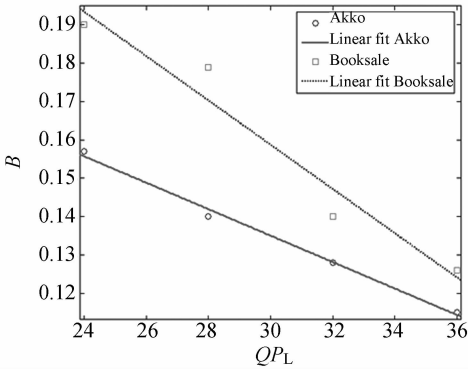
从图 1(a)、1(b) 中可见, 随着 ΔQP 的增加, Ratio 基本呈指数增长, 所以 Ratio 的拟合表达式如下:

$$Ratio = A \times e^{B \times \Delta QP}, \quad (3)$$

其中: A 和 B 分别表示幅度和频率, 它们与 QP_L 的值相关, 图 2(a)、2(b) 分别为参数 A 与 QP_L 、参数 B 与 QP_L 的变化关系。对于参数 A , 其实际意义为当左、右帧采用相同 QP 进行编码时的码率之比。从图 2(a) 中可以看出, 该参数基本为固定



(a) 参数 A 与 QP_L 的关系
(a) Relationship between QP_L and coefficient A

(b) 参数 B 与 QP_L 的关系(b) Relationship between QP_L and coefficient B 图 2 参数 A 和参数 B 的确定Fig. 2 Determination of coefficients A and B

值 1.1。图 2(b) 则反映了参数 B 与 QP_L 的近似线性关系:

$$B = b_1 \times QP_L + b_2, \quad (4)$$

其中: b_1 、 b_2 为模型参数。

3 码率控制算法

通过建立左右帧之间的指数 RRQ 模型, 本文提出了一种非对称质量的立体视频编码码率控制算法。图 3 为算法采用的编码预测结构, 其中, L 和 R 分别表示左、右视点, 对左视点的 P 帧采用运动估计补偿, 对右视点的 P 帧采用运动估计补偿和视差估计补偿。为了有效地进行码率控制, 将左右视点 2 个独立的 GOP 组成一个 SGOP (Stereoscopic Group of Pictures), 同一时刻的左右帧构成一个立体图像对。提出的算法分为 3 层: SGOP 层码率控制、立体图像对层码率控制和帧层码率控制。

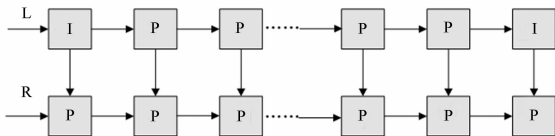


图 3 立体视频编码结构

Fig. 3 Coding structure for stereoscopic video

3.1 SGOP 层码率控制

SGOP 层码率控制主要是确定每个 SGOP 可分配的比特数, 并计算每个 SGOP 中关键帧的量化参数。

第 i 个 SGOP 的初始可分配比特数 $T_r(i, 0)$ 表示为:

$$T_r(i, 0) = \frac{u(i, 0)}{F_r} \times N - \left(\frac{B_s}{8} - B_c(i, 0) \right), \quad (5)$$

其中: $u(i, 0)$ 表示初始带宽; F_r 表示帧率; N 表示 SGOP 中的立体图像对数; B_s 表示缓冲区容量; $B_c(i, 0)$ 为编码完前一个 SGOP 后缓冲区的占用度。为了使各个 SGOP 之间的质量保持稳定, 在每个 SGOP 编码完后, $B_c(i, 0)$ 应该保持在 $B_s/8$ 左右。

在对第 i 个 SGOP 中第 j 个立体图像对进行编码时, 剩余比特数为:

$$T_r(i, j) = T_r(i, j-1) + \frac{u(i, j) - u(i, j-1)}{F_r} \times (N - j) - A(i, j-1), \quad (6)$$

其中: $u(i, j)$ 表示编码当前立体图像对时的带宽, $A(i, j-1)$ 表示编码前一个立体图像对消耗的比特数。

在左、右视点关键帧的量化参数计算为:

$$QP_L(i, 0) = \frac{S_{LQP}}{N-1} - \frac{8T_r(i-1, N)}{T_r(i, 0)} - \frac{N}{15} - 1, \quad (7)$$

$$QP_R(i, 0) = \min \left\{ \frac{S_{RQP}}{N-1} - \frac{8T_r(i-1, N)}{T_r(i, 0)} - \frac{N}{15} - 1, QP_L(i, 0) + VT_{QP}(i, 0) \right\}, \quad (8)$$

其中: S_{LQP} 、 S_{RQP} 分别表示前一个 SGOP 中左、右视点 P 帧 QP 的总和, $VT_{QP}(i, 0)$ 表示左右帧之间可允许的量化参数差值^[14], 计算方式为:

$$VT_{QP}(i, 0) = p_1 \times QP_L(i, 0) + p_2, \quad (9)$$

其中: p_1 、 p_2 分别取 -0.3265 和 17.35 。

3.2 立体图像对层码率控制

立体图像对层码率控制主要是根据当前 SGOP 中剩余比特数和缓冲区饱和度来计算立体图像对的总目标比特数。根据当前 SGOP 中剩余比特数 $T_r(i, j)$, 计算当前立体图像对的第一候选目标比特数:

$$\hat{T}(i, j) = \frac{T_r(i, j)}{N-j}. \quad (10)$$

为了防止缓冲区上溢和下溢,比特数的分配还应当考虑当前缓冲区的饱和度。根据缓冲区的占用情况,计算当前立体图像对的第二候选目标比特数:

$$\tilde{T}(i, j) = \frac{u(i, j)}{F_r} + \gamma \times (TB(i, j) - CB(i, j)). \quad (11)$$

其中: $TB(i, j)$ 和 $CB(i, j)$ 分别表示目标缓冲区大小和实际缓冲区大小, $\gamma=0.75$ 。

最后,将第一候选目标比特数和第二候选目标比特数进行加权,获取当前立体图像对的目标比特数:

$$T(i, j) = \beta \times \hat{T}(i, j) + (1 - \beta) \times \tilde{T}(i, j). \quad (12)$$

其中: $\beta=0.5$ 。

3.3 帧层码率控制

帧层码率控制主要是根据当前立体图像对的目标比特数和双目之间可利用的视觉阈值,计算左、右视点中非关键帧的量化参数。

式(3)描述了通过 QP_L 和 ΔQP 计算左右帧码率比例 Ratio 的指数模型。事实上,只有通过计算出左右帧码率比例确定了各帧的比特数才能计算出 QP_L 。因此,这属于一个“蛋鸡悖论”问题,本文通过求取最优解的形式来解决。

具体计算步骤如下:

1. 由于立体视频质量主要由质量高的通道确定,因此,这里考虑左通道的质量稳定性,对当前左帧的量化参数进行质量约束,使 $QP_L(i, j-1) - 2 \leq QP_L(i, j) \leq QP_L(i, j-1) + 2$,从而计算出当前左帧的5个候选量化参数 QP_L ;

2. 利用式(9)计算出5个候选双目视觉阈值 VT_{QP} ,以 VT_{QP} 为左右帧量化参数差值,计算出当前右帧的5个量化参数 QP_R ,同时利用式(3)计算出5个候选码率比例 $Ratio_C$;

3. 根据5个候选码率比例 $Ratio_C$ 得出5组左右帧的候选目标码率 $\{R_{C,L}, R_{C,R}\}$,再利用二次

RQ模型^[15]计算出5组左右帧的候选量化参数对 $\{QP_{C,L}, QP_{C,R}\}$;

4. 当满足 $\min\{|QP_{C,R} - QP_{C,L} - VT_{QP}|\}$ 时,候选量化参数对 $\{QP_{C,L}, QP_{C,R}\}$ 即为最佳编码量化参数对。

4 实验结果与分析

为了验证所提出算法的有效性,对标准视频测试序列 Akko(640×480)、Ballroom(640×480)、Booksale(320×240)和 Crowd(320×240)进行测试。实验中,左右视点各编码150帧,SGOP长度设置为15帧,目标码率分别设置为300、600、1 000和2 000 kb/s。将本文算法与对称算法、文献[8]算法进行对比,其中对称算法为对左右视点码率进行平均分配,单个视点中码率分配方案采用传统的JVT-G012算法^[15]。实验结果主要对码率控制精度、率失真性能和视频质量波动进行评测。

4.1 码率控制精度

码率控制偏差(Rate Control Error, RCE)定义为:

$$RCE = \frac{|R_{actual} - R_{target}|}{R_{target}} \times 100\%. \quad (13)$$

其中: R_{target} 表示目标码率, R_{actual} 表示实际码率。

表2列出了3种算法的实际码率和RCE,其中:对称算法的RCE平均值为0.14%,文献[8]算法的RCE值平均为3.36%,而本文算法的平均值为0.21%。可以看出,文献[8]算法的控制偏差较大,这是由于在每个GOP中该方法需要利用前4帧进行固定QP编码来计算RQ模型的4个参数,且采用的对数RQ模型参数估计不够准确,使码率控制精度较低。而本文算法和对称算法的码率控制偏差都较小,且都在有效范围之内,这是由于这两种算法在计算每帧的量化参数时采用了二次RQ模型,模型参数能够进行逐帧更新,从而提高了码率控制精度。

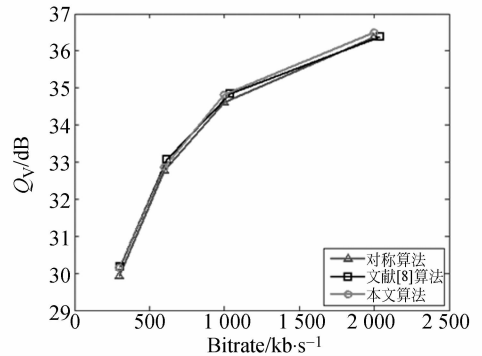
表 2 3 种算法的码率控制精度和立体视频客观质量

Tab.2 RCE and Q_v of three algorithms

视频序列	目标码率 /kbps	实际码率/kb · s ⁻¹			RCE/%			Q _v /dB			Q _v 增益/dB	
		对称算法	文献[8]算法	本文算法	对称算法	文献[8]算法	本文算法	对称算法	文献[8]算法	本文算法	文献[8]算法	本文算法
Akko	300	300.79	319.37	300.85	0.26	6.46	0.28	32.31	32.33	32.48	0.02	0.17
	600	601.09	620.83	602.64	0.18	3.47	0.44	35.72	35.98	36.07	0.26	0.35
	1 000	1 001.49	1 036.74	1 002.28	0.15	3.67	0.23	38.17	38.48	38.51	0.31	0.34
	2 000	2 003.21	2 058.24	2 006.01	0.16	2.91	0.30	41.07	41.24	41.23	0.17	0.16
Ballroom	300	301.18	309.68	301.02	0.39	3.23	0.34	27.78	27.79	27.80	0.01	0.02
	600	600.88	611.20	602.19	0.15	1.87	0.37	30.82	31.05	31.09	0.23	0.27
	1 000	1 001.35	1 039.76	1 001.50	0.14	3.98	0.15	32.94	33.23	33.23	0.29	0.29
	2 000	2 002.56	2 062.49	2 002.92	0.13	3.12	0.15	35.77	36.01	35.93	0.24	0.16
Booksale	300	300.25	307.75	300.61	0.08	2.58	0.20	31.82	31.92	32.09	0.10	0.27
	600	600.40	623.37	601.10	0.07	3.90	0.18	34.30	34.55	34.69	0.25	0.39
	1 000	1 000.02	1 016.45	1 000.34	0.00	1.65	0.03	36.42	36.51	36.72	0.09	0.30
	2 000	1 998.30	2 118.34	2 001.59	0.08	5.92	0.08	39.28	39.25	39.51	-0.03	0.23
Crowd	300	300.40	306.27	300.45	0.13	2.09	0.15	29.91	30.17	30.16	0.26	0.25
	600	600.70	617.19	600.86	0.12	2.87	0.14	32.77	33.06	32.86	0.29	0.09
	1 000	999.57	1 039.33	997.57	0.04	3.93	0.24	34.61	34.84	34.81	0.23	0.20
	2 000	1 994.77	2 042.28	1 997.10	0.26	2.11	0.15	36.37	36.39	36.51	0.02	0.14
平均值	-	-	-	-	0.15	3.36	0.21	-	-	-	0.17	0.23

4.2 率失真性能

表 2 同时列出了 3 种算法的立体视频质量客观评价价值 Q_v 以及文献[8]算法和本文算法相对于对称算法的增益值。其中,文献[8]算法的平均增益值为 0.17 dB,而本文算法的平均值为 0.23 dB,这是由于本文算法充分利用了双目视觉冗余,将更多的比特分配给视觉权重较高的左视点。同时,从图 4 给出的各个序列的率失真性能的比较结果也可以看出,本文算法优于另外两种算法。

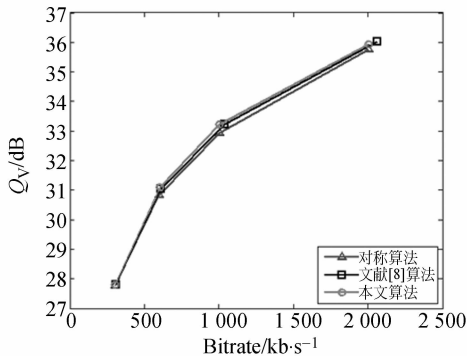


(b) Crowd 的结果

(b)Results of Crowd

图 4 3 种算法的率失真性能比较

Fig. 4 Comparison of rate distortion for three algorithms



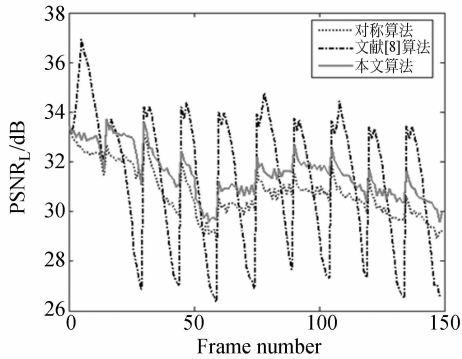
(a) Ballroom 的结果

(a)Results of Ballroom

4.3 视频质量波动

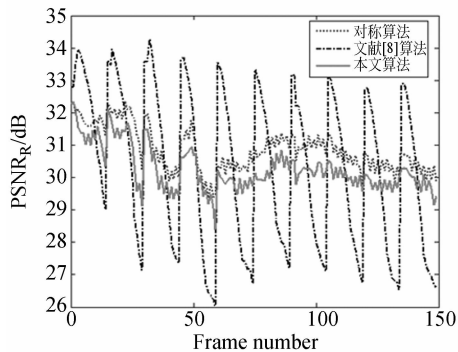
图 5 给出了 Ballroom 序列的左、右视点 PSNR 波动和整体视频 Q_v 值波动。由图 5 可以看出,文献[8]算法的 Q_v 值波动较大,这是由于该算法的每个 SGOP 的初始量化参数都采用固定的 QP,不能根据实际比特的分配情况进行更新,同时,该算法没有将缓冲区作为比特分配的条件,虽然计算复杂度较低,但由此导致的视频质量

波动很大。而本文算法与对称算法的初始量化参数根据前一个 SGOP 中的平均量化参数和实际比特数来确定,这使得视频质量波动较小。同时,本文算法大部分帧的 Q_p 值都高于对称算法,故整体视频质量更为清晰流畅。



(a) 左视点质量波动

(a) PSNR fluctuation of left view



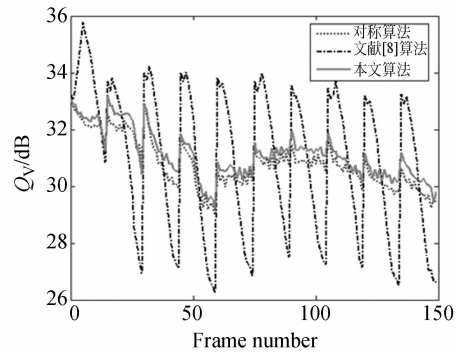
(b) 右视点质量波动

(b) PSNR fluctuation of right view

综合以上 3 项性能评价指标,可以看出本文算法整体优于另外两种算法。本文算法能够提供较好的码率控制精度和率失真性能,并且视频质量波动较稳定。

参考文献:

- [1] AGGOUN A, TSEKLEVES E, ZARPALAS D, *et al.*. Immersive 3D holoscopic video system [J]. *IEEE Transactions on MultiMedia*, 2013, 20(1): 28-37.
- [2] 周怀得, 刘金国, 张立平, 等. 线阵-面阵 CCD 三线阵立体测绘相机焦平面组件的研制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1492-1499.
ZHOU H D, LIU J G, ZHANG L P, *et al.*. De-



(c) 立体视频质量波动

(c) Q_p fluctuation of stereoscopic video

图 5 3 种算法的质量波动比较

Fig. 5 Comparison of quality fluctuation for three algorithms

5 结 论

本文提出了一种基于双目视觉特性的立体视频编码码率控制算法,该方法在以下两个方面有所改进:首先,通过实验统计分析,建立了一种具有较高精度的左右帧的码率比例与量化参数差值之间的指数模型;其次,通过对双目视觉掩蔽效应的分析,在帧层码率控制上进行率失真优化,对左右帧进行非对称的码率分配。实验结果表明,该算法能够将码率偏差平均值控制在 0.21%;与对称质量算法和 Wang 的算法相比,本文算法的立体视频客观质量分别提高了 0.23 dB 和 0.06 dB,同时,视频质量波动更加稳定。在接下来的工作中,我们将重点考虑降低立体视频中码率控制的复杂度问题,使之更加符合移动、无线视频传输。

velopment of focal plane module for three-line LMC-CD mapping cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1492-1499. (in Chinese)

- [3] HU S D, KWONG S, ZHANG Y, *et al.*. Rate-distortion optimized rate control for depth map based 3D video coding [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(2): 585-594.
- [4] 祝世平, 陈菊婧. 基于预搜索的高效双目分形视频编码[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 675-684.
ZHU SH P, CHEN J Q. Efficient stereo fractal

- video coding based on pre-searching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 675-684. (in Chinese)
- [5] 祝世平, 侯仰拴. 快速分形立体视频编码系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2505-2512.
ZHU SH P, HOU Y SH. Design of fast fractal stereo video coding system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2505-2512. (in Chinese)
- [6] LIU S, LIU F, FAN J J, *et al.*. Asymmetric stereoscopic video encoding algorithm based on subjective visual characteristic [C]. 2009 *IEEE International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, Nanjing, China*, 2009: 1-5.
- [7] 卢山, 孙军, 王嘉. 基于人眼立体视觉特性的多视视频码率控制算法[J]. *中国图像图形学报*, 2009, 14(11): 2396-2400.
LU SH, SUN J, WANG J. Multiview video rate control scheme based on human stereo visual feature [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(11): 2396-2400. (in Chinese)
- [8] WANG Q, ZHUO L, ZHANG J, *et al.*. A rate-distortion model based frame layer rate control algorithm for stereoscopic video coding [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2012, 21(4): 678-682.
- [9] MERKLE P, WANG Y, MULLER K, *et al.*. Video plus depth compression for mobile 3D services [C]. 2009 *IEEE 3DTV Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video*, 2009: 1-4.
- [10] CHANG Y J, KIM M. Hybrid codec-based intra-frame joint rate control for stereoscopic video [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2011, 18(10): 543-546.
- [11] JULESZ B. *Foundations of Cyclopean Perception* [M]. USA: The University of Chicago Press, 1971: 54-56.
- [12] OZBEK N, TEKALP A M. Unequal inter-view rate allocation using scalable stereo video coding and an objective stereo video quality measure [C]. 2008 *IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Hannover, Germany*, 2008: 1113-1116.
- [13] ZHAO Y, CHEN ZH ZH, ZHU C, *et al.*. Binocular just-noticeable-difference model for stereoscopic images [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2011, 18(1): 19-22.
- [14] WANG X, JIANG G Y, ZHOU J M, *et al.*. Visibility threshold of compressed stereoscopic image: effects of asymmetrical coding [J]. *Imaging Science Journal*, 2013, 61(2): 172-182.
- [15] LI ZH G, PAN F, LIM K P, *et al.*. Adaptive basic unit layer rate control for JVT [C]. *JVT-G012-r1, the 7th Meeting, Pattaya II, Thailand*, 2003, 7-14.

作者简介:



蒋刚毅(1964—),男,浙江绍兴人,博士,教授,博士生导师,2000年于韩国 Ajou 大学获得博士学位,主要从事多媒体信号处理与通信研究、自由视点视频系统编码与传输、图像与视频质量评价、数码显微镜系统及信号处理等方面的研究。E-mail: jianggangyi@126.com



廖义(1987—),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要从事立体视频编码、图像处理等方面的研究。E-mail: liaoyi518@163.com